

# 第 2 章 金属的晶体结构与结晶

## 知识目标

- ✧ 掌握晶体结构的基本知识；
- ✧ 掌握金属的实际晶体结构；
- ✧ 掌握纯金属及合金的结晶；
- ✧ 理解和认识同素异构转变现象。

## 技能目标

- ✧ 认识不同金属的晶体结构特征,能够从宏观和微观两个角度研究材料的不同性能表现；
- ✧ 善于利用所学的微观理论知识对材料的宏观性能表现进行分析。

不同的金属材料具有不同的力学性能,即使同一种材料,在不同的条件下其力学性能也不相同。金属材料性能的这些差异,从本质上来说,是由其内部结构所决定的。因此,掌握金属的内部结构对金属性能的影响,对选用和加工金属材料具有非常重要的意义。

## 2.1 金属的晶体结构

材料的内部结构是指材料各组成部分质点(原子、分子、离子等)之间的结合方式及其在空间的排列分布规律,即物质的结合键和晶体结构类型。

固态物质按组成质点在空间的排列情况,可分为晶体和非晶体两大类。晶体是指内部原子在空间按一定规则排列的物质,如金刚石、石墨及固态的金属、合金等。晶体具有固定的熔点和各向异性等特征。非晶体是指内部原子排列无一定规则的物质,如玻璃、石蜡、松香等。非晶体物质没有固定的熔点,而且性能无方向性。

### 2.1.1 晶体结构的基本概念

在金属晶体中,原子是按一定的几何规律周期性规则排列的。为了便于研究,人们把金属晶体中的原子近似地设想为刚性小球,这样就可将金属看成是由刚性小球按一定的几何规则紧密堆积而成的晶体,如图 2-1 所示。

#### 1. 晶格

为了便于描述晶体内部原子排列的规则,假设将原子抽象为一个点,称为结点;再用假

想的直线连接结点,形成空间格架,这种假想的空间格架称为结晶格子,简称为晶格,如图 2-2 所示。

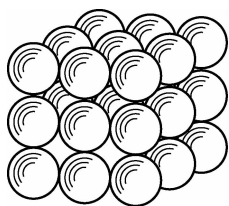


图 2-1 晶体中的原子堆积模型

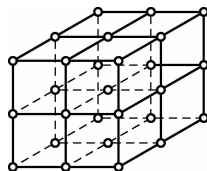


图 2-2 晶格的抽象模型

## 2. 晶胞

晶体的晶格在空间排列有周期性重复的特点。通常把晶格中具有空间排列规则特征的最小几何单元称为晶胞。晶格就是由许多形状、大小和位向相同的晶胞在空间重复叠堆而成的。如图 2-3 所示为晶胞示意图。

## 3. 晶格常数

晶胞三条棱边的长度称为晶格常数,用  $a$ 、 $b$ 、 $c$  表示,棱边夹角用  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  表示。当  $a=b=c$  和  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$  时,这种晶胞称为简单立方晶胞。由简单立方晶胞组成的晶格称为简单立方晶格。如图 2-4 所示为晶胞的晶格常数、棱边夹角示意图。

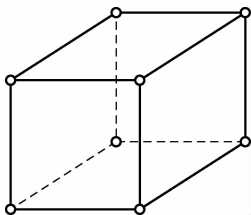


图 2-3 晶胞示意图

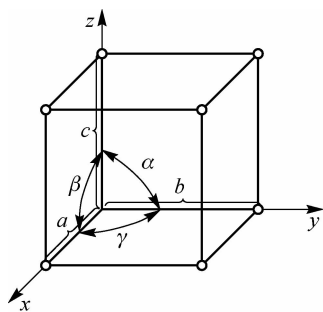


图 2-4 晶胞的晶格常数、棱边夹角示意图

## 4. 晶面、晶向和晶体的各向异性

金属晶体中通过原子中心所构成的不同方位上的原子面称为晶面。通过原子中心所构成的不同方向上的原子列,可以代表晶格空间的一定方向,称为晶向。

由于晶体中不同晶面和晶向上原子排列的紧密程度不同,原子间的结合力大小也就不同,从而在不同的晶面和晶向上会显示出不同的性能,即晶体的各向异性。晶体的这种特性在力学性能、物理性能和化学性能上都能表现出来,并在工业生产中有所应用。

### 2.1.2 金属中常见的晶体结构

由于金属原子之间具有很强的结合力,所以金属晶体中的原子都趋向于紧密排列。但是,不同的金属具有不同的晶体结构,大多数金属的晶体结构都比较简单,其中常见的有以下三种。

### 1. 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞是一个立方体,立方体的 8 个顶角和其中中心各有 1 个原子,如图 2-5 所示。晶胞顶角的原子,实际上是晶格中邻近的 8 个晶胞所共用,只有晶胞中心的原子为该晶胞独有,所以体心立方晶格每个晶胞的实有原子数为 2 个。

属于体心立方晶格的金属有铬、钨、钼、钒和  $\alpha$ -Fe 等。

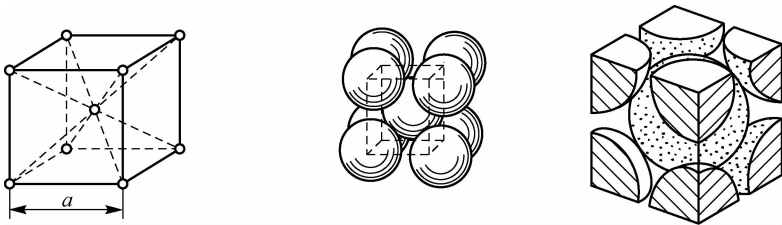


图 2-5 体心立方晶格

### 2. 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞也是立方体,8 个顶角和 6 个面的中心都各有 1 个原子,如图 2-6 所示。同样,晶胞顶角原子为邻近 8 个晶胞共有,各面中心的原子为相邻 2 个晶胞共有,所以面心立方晶格每个晶胞的实有原子数为 4 个。

属于面心立方晶格的金属有铝、铜、镍、金、银和  $\gamma$ -Fe 等。

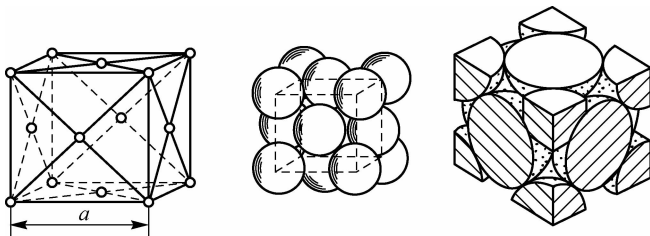


图 2-6 面心立方晶格

### 3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞是一个正六方柱体,12 个顶角和上、下面中心各有 1 个原子,晶胞内部还有 3 个原子,如图 2-7 所示。密排六方晶格每个晶胞的实有原子数为 6 个。

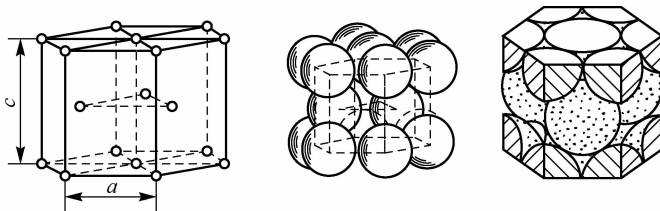


图 2-7 密排六方晶格

属于密排六方晶格的金属有镁、锌、镉等。

#### 4. 常见晶格的致密度

金属晶体的一个显著特点是其原子趋于最紧密的排列,因而金属晶格中原子排列的紧密程度是反映金属晶体结构特征的一个重要因素。晶体中原子排列的紧密程度也常用晶格的致密度表示。晶格的致密度是指晶胞中所含原子的体积与该晶胞的体积之比。表 2-1 列出了三种常见金属晶格的结构特点。

表 2-1 三种常见金属晶格的结构特点

晶格类型	晶胞中的原子数	原子半径	致密度	常见金属
体心立方	2	$\frac{\sqrt{3}}{4}a$	0.68	铬、钨、钼、钒、 $\alpha$ -Fe
面心立方	4	$\frac{\sqrt{2}}{4}a$	0.74	铝、铜、镍、金、银、 $\gamma$ -Fe
密排六方	6	$\frac{\sqrt{1}}{2}a$	0.74	镁、锌、镉

可以看出,在三种常见的晶体结构中,原子排列致密的是面心立方晶格和密排六方晶格,而体心立方晶格要差些。

在不同晶格类型的晶体中,由于原子排列的紧密程度不同,因而具有不同的比容(单位质量物质所占的容积)。当金属的晶格类型发生转变时,会引起金属体积的变化。若体积的变化受到约束,则会在金属内部产生内应力,从而引起工件的变形或开裂。

### 2.1.3 金属的实际晶体结构

如前所述,晶体具有各向异性。但是,工业上实际应用的金属材料,一般不具备各向异性。因为晶体各向异性特征在理想晶体(单晶体)时可充分体现,而实际金属的晶体结构往往存在各种缺陷,同时大都并非单晶体组织,而是多晶体组织(许多位向不同的小单晶体晶粒集合组织),因而不同位向的性能差异互相综合抵消,掩盖了晶体的“各向异性”。

#### 1. 多晶体结构

实际使用的金属材料,绝大部分并非理想的单晶体,而是由许多小晶体(晶粒)组成的多晶体,如图 2-8 所示。这些晶粒在相同条件下具有相同的晶格排列规则,即晶格结构相同,但彼此晶格位向不同。多晶体中每个外形不规则的小晶体称为晶粒,晶粒与晶粒的界面就是晶界。只有采用专门的技术,才能获得晶格位向完全一致的晶体,即单晶体。实际金属的多晶界的晶体结构对金属的性能有很大的影响。

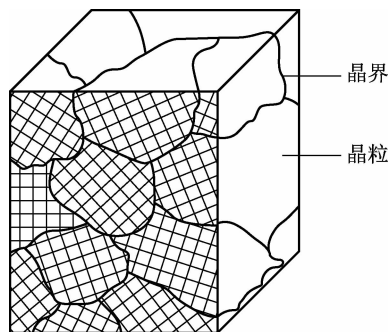


图 2-8 多晶体示意图

#### 2. 晶体缺陷

实际金属晶体内部的原子排列,并不像理想晶体那样完整和严守“规则”,由于各种原因使原子的规则排列遭到破坏,存在着局部和区域的晶体缺陷。晶体缺陷对金属材料的性能有很大影响。



根据晶体缺陷的几何特征,晶体缺陷分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三类。

### 1) 点缺陷

点缺陷指晶体内部空间尺寸很小的缺陷,常见的有“晶格空位”和“间隙原子”,如图 2-9(a)所示。在晶格空位和间隙原子附近,原子间距和相互作用力发生变化,形成“晶格畸变”,内部产生应力,从而使强度、硬度提高,塑性、韧性降低,形成强化效应。因此,晶格畸变也是金属材料的一种强化手段。

### 2) 线缺陷

线缺陷指晶体内部某一平面上沿一个方向呈线状分布的缺陷,常见的线缺陷是刃型位错,如图 2-9(b)所示。在位错线附近区域晶格畸变,从而影响金属性能,同样使强度、硬度提高,塑性、韧性降低。

### 3) 面缺陷

面缺陷指晶体内部呈面状分布的缺陷,常见的有晶界和亚晶界,如图 2-9(c)和 2-9(d)所示。金属的实际结构多为多晶体结构,多晶体内相邻的不同位向晶粒之间,存在着过渡的不规则排列的原子层,这种过渡层称为晶界。晶界原子层的不规则排列也是一种晶格畸变,造成金属强度、硬度增高而塑性变形困难。晶粒细则晶界增多,金属的强度、硬度也较高,这就是“细晶强化”的基本原理。

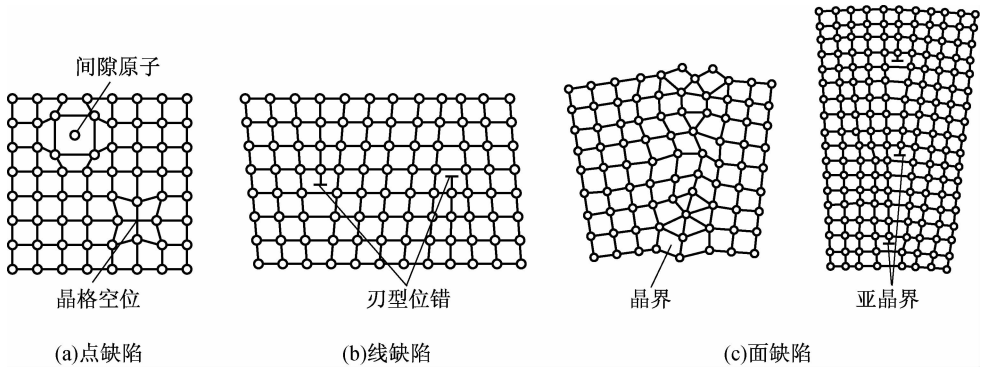


图 2-9 晶体缺陷

在晶粒内部,也并非像理想的单晶体那样晶格规律且统一,晶粒不同部位往往存在一定的位向差(一般只有几分,最多达  $1^\circ \sim 2^\circ$ ),形成晶粒内部的“小晶块”。相邻的有很小位向差的小晶块之间也有原子排列不太规则的过渡交界区,这种交界区称为亚晶界。亚晶界也形成晶格畸变,有强化金属力学性能的作用。

综上所述,实际金属晶体一般不是单晶体,而是多晶体材料,且存在许多晶体缺陷。其特点、形式及对性能的影响见表 2-2。

表 2-2 实际金属晶体的特点、形式及对性能的影响

晶体缺陷类别	主要形式	对材料性能的影响
点缺陷	晶格空位,间隙原子,置换原子	金属扩散的主要方式
线缺陷	刃型位错,螺型位错	加工硬化,固溶强化,弥散强化
面缺陷	晶界,亚晶界	易腐蚀,易扩散,熔点低,强度高,细晶强化

## 2.2 纯金属及合金的结晶

### 2.2.1 纯金属的结晶

金属制品一般都需要经过熔炼、浇注、压力加工、切削加工等工艺过程而制成,其中熔炼浇注形成的铸态组织对金属材料的性能有重大影响。研究金属与合金的凝固结晶过程,了解其基本规律,从而了解金属材料及其制品的组织 and 性能,是非常重要的。

#### 1. 金属的结晶

金属的结晶是金属原子的聚集状态由无规则的液态转变为规则排列的固态晶体的过程。

每种金属都有固定的熔点,也就是固定的结晶温度 $t_0$ ,这是在极缓慢的冷却条件下用热分析法测定的,通常称之为理论结晶温度。如图2-10所示为用热分析法测定的金属冷却曲线。

金属的结晶过程可用冷却曲线来描述。当金属冷却到某一温度时,冷却时间增加而温度不再下降,出现一个水平台阶,该阶段对应的温度即为结晶温度。这是因为结晶时有结晶潜热放出,抵消了冷却散热,所以温度保持不变。结晶完成,结晶潜热不再产生,金属温度随冷却时间增加而继续下降。结晶温度实质是一个平衡温度,是散热和结晶潜热产生的动态平衡过程。

理论结晶温度是金属液态和固态平衡共存的温度,在此温度下结晶不能自发进行。在实际生产中,冷却速度不可能无限缓慢,当以一定的冷却速度冷却结晶时,实际结晶温度 $t_1$ 低于理论结晶温度 $t_m$ 。当 $t_1$ 低于 $t_m$ 时,结晶可自发完成,理论结晶温度与实际结晶温度之差 $\Delta t$ ,称为过冷度,即

$$\Delta t = t_m - t_1 \quad (2-1)$$

过冷度是金属结晶过程自发进行的必要条件。

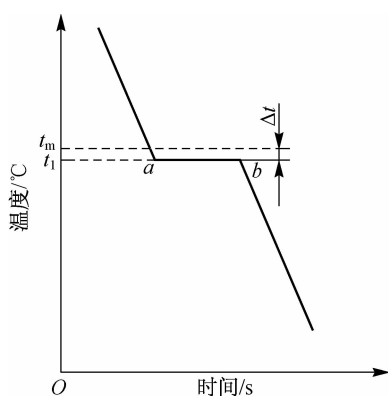


图 2-10 金属冷却曲线



**小提示**

对于同一种金属熔液,冷却速度越快,过冷度也越大,即金属的实际结晶温度越低。

#### 1) 金属的结晶过程

液态金属的结晶过程由晶核的形成和晶核的长大两个环节组成。液态金属冷却到一定温度时,液体中有部分原子开始按一定规则排列,形成细小的晶胚,部分尺寸较大的晶胚形成继续结晶的核心,称为晶核。晶核在冷却过程中不断集结液体中的原子而逐渐长大,同时新的晶核也不断形成和长大,直至由晶核长大形成的晶粒彼此接近,液态金属逐渐消失而完

成结晶,如图 2-11 所示。

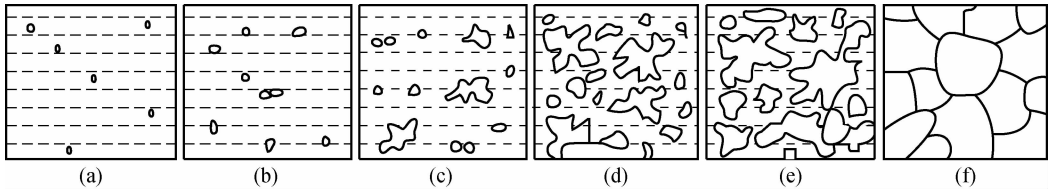


图 2-11 纯金属的结晶过程

液态金属原子自发形成的晶核,称为自发晶核。在实际结晶过程中,金属液体中的某些杂质也能成为金属结晶核心而形成晶核,这种晶核称为非自发晶核。在金属的结晶过程中,通常是自发晶核和非自发晶核同时并存,而且非自发晶核对结晶的推动作用往往更为重要。因此,对非自发晶核的控制,如加入非自发晶核物质——人工晶核等,已成为调整控制结晶过程的重要手段。

晶核长大的实质是液体原子向固态晶核表面集结迁移的过程。当过冷度较大时,特别是非自发晶核较多时,晶核常以树枝状状态长大,形成树枝状晶体,简称为枝晶。枝晶继续长大,最后形成晶粒。

金属液体中晶核的形成先后不一,长大的条件也不同,因而形成的晶粒大小和位向各不相同。晶粒之间最后形成过渡的界面称为晶界,晶界把晶粒联结起来组成多晶体。最后,结晶的晶界原子形成不太规则的过渡排列,所以,晶界对金属性能有很大的影响。

## 2) 晶粒大小及其控制

(1) 晶粒大小对金属性能的影响。实际金属结晶后形成多晶体,晶粒的大小对力学性能影响很大。一般情况下,晶粒细小则金属强度、塑性、韧性好,且晶粒越细小,性能越好。

晶粒的大小通常以单位截面面积上的晶粒数或晶粒平均直径来表示。纯铁晶粒大小对其强度和塑性的影响见表 2-3。

表 2-3 纯铁晶粒大小对其强度和塑性的影响

晶粒平均直径/ $\mu\text{m}$	9.7	7	2.5	0.2	0.16	0.1
抗拉强度/MPa	168	184	215	268	270	284
断后伸长率/%	28.8	30.6	39.5	48.8	50.7	50



请注意

并非任何金属材料都要求晶粒越细越好,如制造电机、变压器的硅钢片,就要求晶粒粗大。因为晶粒粗大的硅钢片磁滞损耗较小,电磁效率高,所以,对于材料晶粒大小的要求,必须根据实际需要而定。

(2) 晶粒大小的控制。金属晶粒的大小主要取决于结晶过程中的形核率  $N$  (单位体积中单位时间形成的晶核数) 和晶核长大速率  $G$  (单位时间内晶核长大的线速度)。形核率  $N$  大,则结晶后晶粒多、细;而长大速率  $G$  大,则晶核长大快,晶粒就粗大。

在一般冷却条件下,冷却速度提高,则过冷度大,而形核率  $N$  和长大速率  $G$  均随过冷度增大而增大。由于形核率  $N$  随过冷度增大的速度比长大速率  $G$  快,因此最后结果是晶粒细化。但当冷却速度极大时,过冷度很大,开始结晶温度非常低,造成液态金属中原子扩散困

难,形核率  $N$  反而减小,使结晶进行困难。因此,极度提高冷却速度,增大过冷度,反而不能达到细化晶粒的目的。在实际生产条件下,一般不可能达到极大的过冷度,采用提高冷却速度增大过冷度的方法是细化晶粒的有效手段,也是“细晶强化”的常用方法。

除了通过控制过冷度来控制晶粒大小外,在结晶过程中进行变质处理,也是常用的控制手段。变质处理是在液态金属浇注前专门加入可成为非自发晶核的固态变质剂,以增加晶核数,提高形核率,达到细化晶粒的目的。通常在钢中加入铝、钒等,在铝合金中加入钛、锆等。对于一些大型铸件,冷却速度不可能很大,难于通过控制过冷度来细化晶粒,变质处理就成为大型铸件细化晶粒、改善性能的重要手段。其他中、小型铸件,则可通过提高过冷度和变质处理相结合的方法来控制晶粒细化度。

此外,还可以采用机械振动、超声波振动和电磁振动等方法,使结晶过程中形成的枝晶折裂碎断,增加晶核数,达到细化晶粒的目的。

## 2. 金属铸锭组织

金属铸锭可看做形状简单的大型铸件,是金属型材的基础坯材,其组织性能对金属型材有很大的影响。铸锭的表层和中心因冷却结晶条件不同,结晶后从表面到中心形成三个具有不同特征的结晶区。如图 2-12 所示为铸锭组织的剖面示意图。

### 1) 表层细晶粒区

液态金属注入低温铸锭模时,紧接金属模壁的液态金属层被激冷,大的过冷度使形核率也增大;同时金属模壁还能促进非自发晶核的产生,因此在铸锭表层形成等轴细晶粒区。

### 2) 柱状晶粒区

在表层细晶粒区形成的同时,模壁温度逐渐升高,使金属液的冷却速度逐渐下降,过冷度减小,形核率降低而长大速率变化不大。由于垂直模壁方向散热较快,有利于液态金属沿垂直模壁方向向内部结晶,晶粒沿此方向长大较快,因此形成垂直于模壁向内部金属液生长的柱状晶粒区。

### 3) 中心等轴晶粒区

随着柱状晶粒的形成,铸锭模中心部分剩余金属液的散热冷却已无明显的方向性,趋于均匀冷却并处于相近的过冷状态,同时液态金属中的杂质和枝晶碎片也集聚到这最后结晶的中心部分,在过冷度不大的情况下最后形成晶粒较为粗大的等轴晶粒区。

铸锭组织就是由表层细晶粒区、柱状晶粒区和中心等轴晶粒区组成的不均匀组织。

表层细晶粒区组织致密、均匀,力学性能好,但一般都很薄,对铸锭的性能影响不大。但若采取强制水冷等措施,扩大增厚表层细晶粒区,对改善提高金属性能有积极意义。

在柱状晶粒区的柱状晶粒的晶界中常富集非金属夹杂物和低熔点杂质,形成易开裂的脆性层。同时,柱状晶粒的力学性能有方向性,造成整个柱状晶粒区的力学性能也有方向性。因此,柱状晶粒区性能较差,应控制减小柱状晶粒区。但是,对于塑性较好的合金和有色金属,在热压力加工时通常不会开裂,而且柱状晶粒区组织较中心等轴晶粒区组织致密,性能也较好,所以对于塑性好的金属材料铸锭,可获得较大的柱状晶粒区。此外,一些承受单向载荷的机械零件,如汽轮机叶片等,可利用金属柱状晶粒轴向力学性能较好的特点,采

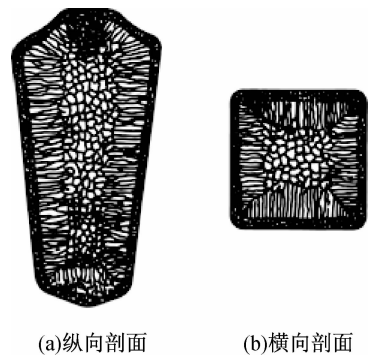


图 2-12 铸锭组织剖面示意图

用定向结晶以获得方向性强的柱状晶粒区,从而有效地提高零件的使用性能。

中心等轴晶粒区不同位向的晶粒交错咬合,力学性能无方向性,但由于是最后凝固结晶,组织较疏松,易生成偏析、夹杂、气孔和微缩孔等缺陷,以致影响金属零件的性能。

## 2.2.2 合金的结晶

纯金属一般力学性能不高且制取成本高,应用受到限制,因此实际使用的金属材料很少是纯金属。合金可根据不同需要配制,从而获得不同的力学性能和物理、化学性能,因而得到广泛的应用。常用的碳钢、铸铁、合金钢、硬铝、青铜等金属材料都是合金。

### 1. 合金的基本概念

#### 1) 合金

合金是一种金属与另一种或几种金属、非金属熔合组成的且具有金属特性的物质,如铁和碳组成的铁碳合金——碳钢、铸铁等,铜和锌组成的合金——黄铜等。

#### 2) 组元

组元是组成合金的最基本的、独立的物质,简称元。组元通常是组成合金的元素或某些稳定的化合物。由两个组元组成的合金称为二元合金,由三个组元组成的称为三元合金,依此类推。相同组元可按不同比例配制成性能不同的系列合金,构成一个合金系列,简称为合金系,如铅锡二元合金系等。

#### 3) 相

相是指金属或合金中化学成分相同、结构相同或原子聚集状态相同,并与其他部分之间有明确界面的独立均匀组成部分,如液态纯金属与结晶出的固态纯金属即为液、固两相。合金中由成分、结构相同的同一种晶粒组成的多晶体组织,虽然晶粒间有界面,仍为同一种相;若由成分、结构不同的几种晶粒组成,则为多相组织。

#### 4) 组织

组织是指用肉眼可直接观察的,或用放大镜、显微镜能观察分辨的材料内部微观形貌图像。通常又把借助金相显微镜、电子显微镜观测的内部微观形貌图称为“显微组织”。通过对组织的观察分析,可了解材料内部各组织组成相的大小、形态、分布和相对数量等,从而进一步了解材料的性能及其变化规律。例如,珠光体是铁碳合金的一种组织,它由铁素体和渗碳体两相组成,形态是片层相同,分布均匀。退火状态的亚共析钢显微组织由铁素体和珠光体两种组织组成,而从相的角度来说,还是由铁素体和渗碳体两相组成。

### 2. 合金的相结构

大部分的合金在液态时组元能相互融合,形成均匀的单一液相。而在固态时,由于组元之间相互的不同作用,可以形成不同的相结构,成为合金不同的组织组成相。按合金中组成相的结构特征,可将合金分为固溶体和金属化合物两类。

#### 1) 固溶体

固态合金中,一组元的晶格中溶入另一种或多种其他组元而形成的均匀相,称为固溶体。保留晶格的组元称为溶剂,溶入晶格的组元称为溶质。

根据溶质原子在溶剂中分布的位置不同,可将固溶体分为间隙固溶体和置换固溶体两类。

(1) 间隙固溶体。间隙固溶体是溶质原子溶入溶剂晶格的间隙而形成的固溶体,如图 2-13(a) 所示。由于晶格间隙一般都很小,因此要求溶质的原子半径必须很小,通常是溶质原子直径与溶剂原子直径之比小于 0.59 时才能形成间隙固溶体。间隙固溶体都是有限

固溶体。铁碳合金中的铁素体,就是碳溶入  $\alpha\text{-Fe}$  中形成的间隙固溶体。

(2)置换固溶体。置换固溶体是溶质原子置换溶剂晶格结点上部分原子而形成的固溶体,如图 2-13(b)所示。在固态时两组元能按任意比例相互溶解的置换固溶体,称为无限固溶体或连续固溶体,如铜镍合金等。在固态时溶质的溶入有一定限度的置换固溶体,称为有限固溶体,如铜锌合金、铁碳合金等。有限固溶体的溶质原子超过限度时,固溶体内将析出新相。大部分的合金都属有限固溶体,而形成无限固溶体必须具备一定的条件。置换固溶体的溶质溶解度并非固定不变,一般随温度变化而变化,温度升高溶解度增大,温度降低则溶解度减小。

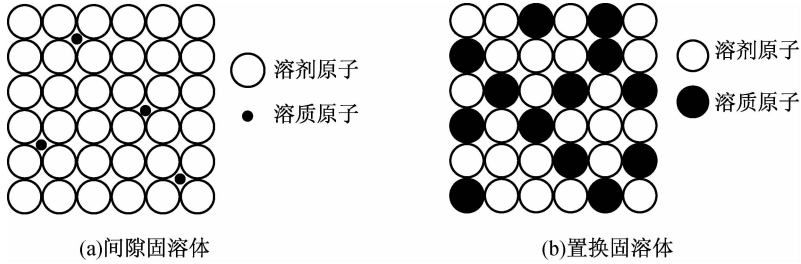


图 2-13 固溶体的类型

无论是间隙固溶体还是置换固溶体,都是均匀的单相组织,晶格类型保持溶剂的晶格类型,但由于溶质原子的溶入使晶格畸变,因而固溶体的强度、硬度比溶剂要高。这种通过溶入溶质原子形成固溶体而强化的手段称为固溶强化,是提高金属材料力学性能的重要途径。

### 2) 金属化合物

合金组元间按一定比例组成,并形成具有新的晶格结构和明显金属特性的新相,这种新相称为金属化合物。金属化合物可用一定的分子式来表示,如  $\text{Mg}_2\text{Si}$ 、 $\text{Fe}_3\text{C}$ 、 $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$  等。金属化合物通常具有复杂的晶格结构,熔点高、硬度高而脆性大,在合金中金属化合物可提高硬度和强度,但降低塑性和韧性,是金属材料中的重要强化相。

### 3) 多相复合组织

合金中的组元相互作用,一般并非简单地形成一种固溶体或一种金属化合物,而可形成多种固溶体和金属化合物,最后组成多相复合组织。这种由两种以上的相组成的多相组织合金,称为多相复合组织合金,如钢铁这类铁碳合金,大都是铁素体和渗碳体或铁素体和石墨组成的多相复合组织合金。铁素体是固溶体,渗碳体是金属化合物,而石墨是碳的一种特殊晶体形态的单相物质,它们组成了铁碳合金的多相复合组织。

多相复合组织合金的性能主要取决于各组成相的数量、形态、分布状况和性能。当组成相数量不变时,形态和分布等组织状况对性能影响很大。如组成相呈球状并弥散分布时,合金的综合力学性能好,而呈骨架、块、网状聚集时,其力学性能显著恶化。通常根据合金组成相的组成比例和各相的力学性能,用算术平均原则来估算其性能。

合金的相结构对合金的性能有很大影响,表 2-4 归纳了合金相结构的特征。

表 2-4 合金相结构的特征

类别	分类	在合金中的位置及作用	力学性能特点
固溶体	置换固溶体、间隙固溶体	基本相,提高塑性及韧性	塑性、韧性好,强度比纯组元高

续表

类别	分类	在合金中的位置及作用	力学性能特点
金属化合物	正常价化合物、电子价化合物、间隙化合物	强化相, 提高强度、硬度及耐磨性	熔点高, 硬度高, 脆性大

### 3. 合金的结晶

不同成分的合金, 在高温液态时通常为均匀单相熔液, 而在冷却结晶后, 可形成单相的固溶体组织或金属化合物组织, 但更多的是形成由几种固溶体或由固溶体和化合物组成的多相组织, 并且随温度等条件变化, 组成相还会变化。一定成分的合金在一定温度究竟形成什么组织, 通常可由合金相图来确定。详细介绍见第 3 章内容。

## 2.3 金属的同素异构转变

一般金属冷却结晶后, 晶格类型不再变化, 一直保持至室温, 如铝、铜等金属。但有一些金属, 如铁、钴、锰、钛、锡等, 在固态时因温度变化而会发生晶格类型的变化。金属这种在固态时随温度变化而晶格类型发生变化的现象, 称为同素异构转变, 也称同素异晶转变。

通过研究纯铁的冷却结晶过程, 发现纯铁具有典型的同素异构转变特征。如图 2-14 所示为纯铁的冷却曲线, 它表示了纯铁的结晶和同素异构转变的过程, 纯铁熔液从高温冷却至 1 538 °C 以下, 结晶成具有体心立方晶格的 δ-Fe; 固态的 δ-Fe 继续冷却至 1 394 °C 以下, 铁原子重新排列, 由体心立方晶格的 δ-Fe 转变为面心立方晶格的 γ-Fe; 再继续冷却至 912 °C 以下, 面心立方晶格的 γ-Fe 又转变为体心立方晶格的 α-Fe。再继续冷却, 晶格类型不再发生变化, 一直保持体心立方晶格的 α-Fe 至室温。如果将室温的纯铁进行加热, 上述转变可逆向进行。即

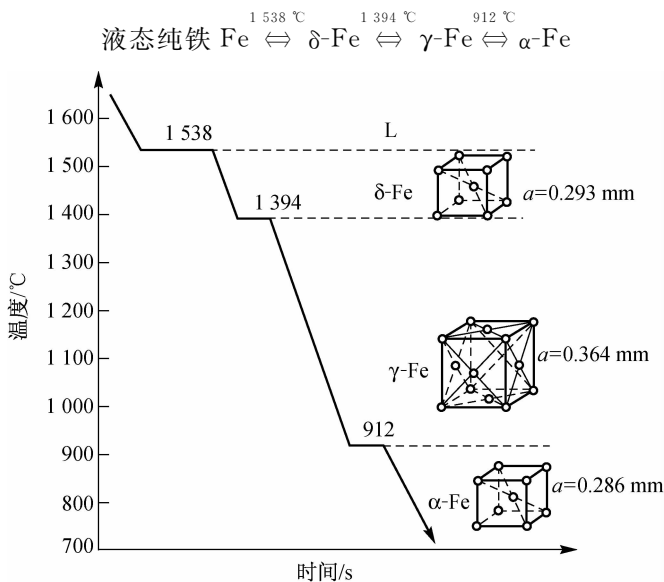


图 2-14 纯铁的冷却曲线

纯铁的同素异构转变是钢铁热处理的主要基础,也是钢铁材料的性能可以调节改善并得到广泛应用的重要原因。

同素异构转变是原子重新排列的一个结晶过程,遵循结晶的基本规律,但由于原子在固态下扩散迁移比液态下困难,因此同素异构转变要求较大的过冷度,以推动结晶过程充分完成。为了与液态金属结晶过程相区别,通常称同素异构转变的结晶过程为“重结晶”。

## 习 题 2

- 2-1 常见的金属晶体结构有哪几种?  $\alpha$ -Fe、 $\gamma$ -Fe、Al、Cu、Ni、Pb、Cr、V、Mg、Zn 各属何种晶体结构?
- 2-2 金属的实际晶体结构有何特点?
- 2-3 何谓结晶? 结晶过程的基本规律是什么?
- 2-4 什么是固溶强化?
- 2-5 结晶过程中如何控制晶粒大小? 它有何作用?
- 2-6 金属铸锭组织有哪几个晶粒区? 说明它们的形成过程。
- 2-7 什么是同素异构转变? 试用纯铁为例作说明。



# 第 3 章 铁碳合金相图

## 知识目标

- ✦ 掌握铁碳合金基本组织的定义、表示符号、晶体结构、显微组织特征、形成条件及性能特点；
- ✦ 掌握铁碳合金相图的构成、图中特性点、特性线的含义，典型合金的结晶过程分析及其组织，室温下不同区域的组织组成相；
- ✦ 掌握碳的质量分数对铁碳合金组织和性能的影响。

## 技能目标

- ✦ 了解基本组织的相结构和性能，并且结合第 2 章知识进行分析对比；
- ✦ 掌握铁碳合金在钢材材料的选用和铸、锻等热加工工艺制订等方面的应用。

铁碳合金是现代机械工业中应用最为广泛的金属材料。铁和碳是钢铁材料中的两种最基本元素。铁碳合金相图是研究铁碳合金的成分、温度和组织之间的变化关系并推断合金性能的重要工具。了解和掌握铁碳合金相图，对于制订钢铁材料的各种加工工艺具有重要的指导意义。

## 3.1 铁碳合金的基本组织

铁和碳的合金称为铁碳合金，是钢和铁的总称，是工业上应用最广泛的合金。铁碳合金是以铁为基本元素，以碳为主加元素的合金。铁碳合金在液态时，铁和碳可以无限互溶。在固态时，碳溶于铁中形成固溶体。当含碳量超过碳在铁中的固态溶解度时，则出现金属化合物，也可以形成由固溶体和金属化合物组成的机械混合物。在固态下的基本组织有铁素体、渗碳体、奥氏体、珠光体、莱氏体等。

### 3.1.1 铁碳合金中的相

#### 1. 铁素体

铁素体是碳溶于  $\alpha$ -Fe 中形成的间隙固溶体，用 F 表示。在显微镜下观察，铁素体为均匀明亮的多边形晶粒，其显微组织如图 3-1 所示。铁素体保持  $\alpha$ -Fe 的体心立方晶格，碳在  $\alpha$ -Fe 中的溶解度很小，室温下其溶解度接近于零。在  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  时，铁素体中碳的质量分数  $w_{\text{C}}=0.0008\%$ ，至  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$  时有最大溶解度，此时铁素体中碳的质量分数  $w_{\text{C}}=0.0218\%$ 。

铁素体强度、硬度很低，塑性和韧性好，性能近似工业纯铁，一般很少单独用做工程结构材料。铁素体是单相固溶体，是铁碳合金组织中的重要基本相。

## 2. 奥氏体

奥氏体是碳溶于  $\gamma$ -Fe 中形成的间隙固溶体，用 A 表示。用高温金相显微镜观察，奥氏体呈外观不规则颗粒状结构，其显微组织如图 3-2 所示。奥氏体保持  $\gamma$ -Fe 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，所以能溶解较多的碳，即碳在  $\gamma$ -Fe 中的溶解度较大。在  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$  时，奥氏体中碳的质量分数  $w_{\text{C}} = 0.77\%$ ；在  $1148\text{ }^{\circ}\text{C}$  时，碳在  $\gamma$ -Fe 中的溶解度达最大值，此时奥氏体中碳的质量分数  $w_{\text{C}} = 2.11\%$ 。奥氏体有一定的强度、硬度和良好的塑性、韧性，适用于进行锻压加工。奥氏体也是单相固溶体，是铁碳合金组织中当温度高于  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$  时存在的重要高温相。

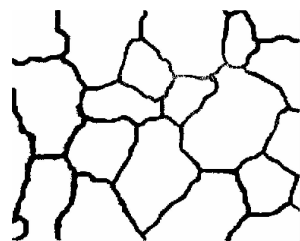


图 3-1 铁素体显微组织

## 3. 渗碳体

渗碳体是铁和碳形成的具有复杂晶格的金属化合物，用  $\text{Fe}_3\text{C}$  表示。其晶体结构如图 3-3 所示。渗碳体中碳的质量分数  $w_{\text{C}} = 6.69\%$ ，硬度高而塑性、韧性极低，熔点为  $1227\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，是铁碳合金中性能硬脆的重要强化相，能以片状、球状和网状等不同形态、不同数量和不同分布状况存在于铁碳合金组织中，对铁碳合金性能有重大影响。渗碳体是亚稳定金属化合物，在一定条件下可分解为铁和石墨，此即铸铁石墨化的重要机理。



图 3-2 奥氏体显微组织

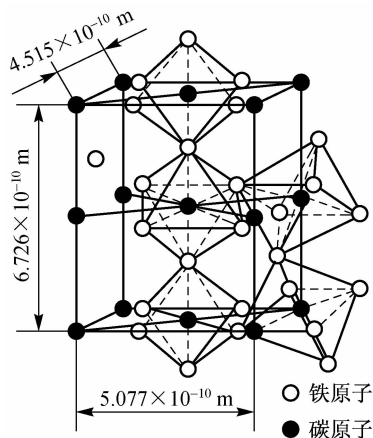


图 3-3 渗碳体晶体结构

## 4. 珠光体

珠光体是由铁素体和渗碳体组成的两相复合组织，用 P 表示。珠光体是碳的质量分数  $w_{\text{C}} = 0.77\%$  的奥氏体在  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$  时固态转变分解的产物，因此，珠光体的碳的质量分数也是  $w_{\text{C}} = 0.77\%$ 。其转变过程是：从单相固溶体奥氏体中同时析出两种互不相溶的组织，即铁素体和渗碳体，组成两相复合组织。这一转变称为共析转变，相应的温度和成分称为共析温度和共析成分，产物（珠光体）称为共析体。共析转变过程可表示为



珠光体的显微组织为黑白交替的片层状组织,组织致密,具有珍珠光泽,如图 3-4 所示。性能介于铁素体和渗碳体之间,具有较高的强度、硬度和足够的塑性、韧性,是铁碳合金组织中的重要基本组织。

### 5. 莱氏体

莱氏体是由奥氏体和渗碳体组成的复相组织,用 Ld 表示。莱氏体是碳的质量分数  $w_C = 4.3\%$  的铁碳合金熔液在  $1148\text{ }^\circ\text{C}$  时直接由液态结晶转变的产物。其转变过程是从熔液中同时结晶出固态的奥氏体和渗碳体,组成复相组织,这种转变称为共晶转变,相应的成分、温度和产物,称为共晶成分、共晶温度和共晶体。莱氏体的共晶转变过程可表示为



图 3-4 珠光体显微组织



随着温度下降至  $727\text{ }^\circ\text{C}$  (共析温度),莱氏体中的奥氏体将转变为珠光体。因此,在此温度以下,莱氏体组织转变为珠光体和渗碳体,这种莱氏体称为低温莱氏体或变态莱氏体,用 Ld' 表示。

莱氏体和变态莱氏体的渗碳体含量大,性能与渗碳体相近,硬度高,脆性大,塑性差,是铁碳合金组织中的脆性组织。

## 3.1.2 铁碳合金的性能

根据含碳量及合金室温组织不同,可以将铁碳合金分为工业纯铁、钢和白口铸铁。常见的铁碳合金类别及性能见表 3-1。

表 3-1 常见的铁碳合金的类别及性能

合金种类		碳的质量分数/%	室温组织	基本力学性能
工业纯铁		0~0.021 8	F	塑性较好,强度很低
钢	亚共析钢	0.021 8~0.77	F+P	良好的强度、韧性,应用广泛
	共析钢	0.77	P	
	过共析钢	0.77~2.11	P+Fe <sub>3</sub> C <sub>II</sub>	
白口铸铁	亚共晶白口铸铁	2.11~4.3	P+Fe <sub>3</sub> C <sub>II</sub> + Ld'	比较脆,应用范围有限
	共晶白口铸铁	4.3	Ld'	
	过共晶白口铸铁	4.3~6.69	Fe <sub>3</sub> C <sub>I</sub> + Ld'	

## 3.2 铁碳合金相图

铁碳合金相图是用试验数据绘制而成的。通过试验的测量,对一系列不同含碳量的铁碳合金进行热分析,测出其在缓慢冷却过程中熔液的结晶温度和固态组织的转变温度,并标入温度-含碳量的坐标中,然后把相应的温度转折点连接成线,称为铁碳合金相图。铁碳合金相图是制订热加工工艺和选材的重要依据,也是钢铁热处理的主要理论基础。

### 3.2.1 相图分析

图 3-5 为简化后的 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图,它去掉了左上角的包晶转变部分,这只是为了便于研究分析。相图的纵坐标表示温度,横坐标表示碳含量。横坐标左端(原点)为  $w_C = 0\%$ ,是纯铁;右端为  $w_C = 6.69\%$ ,是 Fe<sub>3</sub>C。

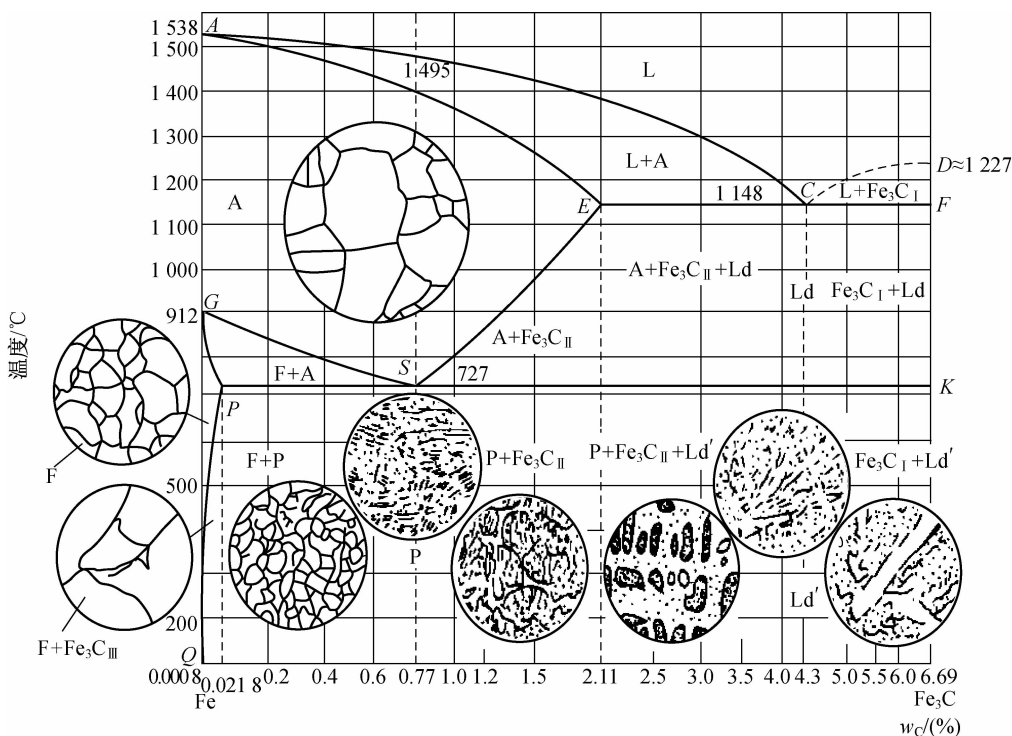


图 3-5 简化后的 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图

#### 1. Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中的特性点

相图中特性点的成分和温度数据,由于测试技术和被测材料纯度的不同而略有不同,因而在不同资料、手册中的相图特性点位置也略有不同。图 3-5 为使用较广泛的简化后的 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图,其各特性点的温度、成分及含义见表 3-2。

表 3-2 简化后的 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图各特性点的温度、成分及含义

特性点	温度/°C	成分 $w_C$ /%	含义
A	1 538	0	纯铁熔点
C	1 148	4.3	共晶点
D	1 227	6.69	渗碳体熔点
E	1 148	2.11	碳在 $\delta$ -Fe 中的最大溶解度
G	912	0	纯铁同素异构转变点
P	727	0.021 8	碳在 $\alpha$ -Fe 中的最大溶解度
S	727	0.77	共析点
Q	600	0.008	600 °C 时碳在 $\alpha$ -Fe 中的溶解度

## 2. Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中的特性线

相图中的特性线,是不同成分铁碳合金具有相同意义的相变点的连线。下面分别介绍其名称、符号和含义。

(1)ACD 线——液相线。任何成分的铁碳合金处在此线以上温度区域时均为液态,缓冷至 AC 段时从液相中开始结晶出奥氏体;缓冷至 CD 段时从液相中开始结晶出渗碳体(一次渗碳体)。

(2)AE<sub>1</sub>CF 线——固相线。任何成分的铁碳合金缓冷至此线时,全部结晶为固态,即此线以下合金均为固态。

(3)ECF 线——共晶线。 $w_C > 2.11\%$  的铁碳合金从液态缓冷到此线(1 148 °C)时,均发生共晶转变,生成莱氏体,即  $L_C \rightleftharpoons Ld(A_E + Fe_3C)$ 。

(4)PSK 线——共析线,又称为 A<sub>1</sub> 线。 $w_C > 0.0218\%$  的铁碳合金中的奥氏体缓冷到此线(727°C)时,均发生共析转变,奥氏体转变为珠光体,即  $A_S \rightleftharpoons P(F_P + Fe_3C)$ 。

(5)ES 线——碳在  $\delta$ -Fe 中的溶解度曲线,又称为 A<sub>cm</sub> 线。表示从 1 148 °C 冷却至 727 °C 过程中,碳在  $\delta$ -Fe 中的溶解度从最大的 2.11% 下降至 0.77%,同时析出渗碳体。为了与自金属液中直接结晶出的渗碳体(称为一次渗碳体)相区别,将这种从固态的奥氏体中析出的渗碳体称为二次渗碳体(Fe<sub>3</sub>C<sub>II</sub>)。所以 A<sub>cm</sub> 线又称为二次渗碳体析出线(冷却时)或二次渗碳体溶解线(加热时)。

(6)GS 线——铁素体—奥氏体转变线,又称为 A<sub>3</sub> 线。此线表示  $w_C < 0.77\%$  的铁碳合金,缓冷时从奥氏体中析出铁素体的起始线,或加热时铁素体转变为奥氏体的终结线。

(7)PQ 线——碳在  $\alpha$ -Fe 中的溶解度曲线。表示铁碳合金从 727 °C 冷却至 600 °C 的过程中, $\alpha$ -Fe 中碳的溶解度从最大的 0.0218% 下降至 0.008%,同时从铁素体中析出渗碳体。这种从铁素体中析出的渗碳体,称为三次渗碳体(Fe<sub>3</sub>C<sub>III</sub>)。三次渗碳体与一次渗碳体、二次渗碳体的成分、结构和性能都相同,只是形成来源、形态和分布不同,因而对铁碳合金的性能有不同的影响。

### 3.2.2 典型合金的结晶过程

#### 1. 共析钢冷却过程分析

共析钢是碳的质量分数  $w_C = 0.77\%$  的铁碳合金。自高温缓冷至 AC 线时,液相中开始结晶出奥氏体。随着温度下降,奥氏体不断增加,其成分沿 AE 线变化;同时液体量不断减少,其成分沿 AC 线变化。温度降至 AE 线,液体全部结晶为奥氏体。继续缓冷至 PSK 线过程中,合金为单相的奥氏体组织,直至冷却到 PSK(S 点、727 °C),奥氏体发生共析转变,形成珠光体 P,再继续冷却至室温,组织不再变化。共析钢的冷却转变过程可表示为



合金在 S 点温度以下缓冷时,严格地分析应有三次渗碳体从铁素体中析出,但因其数量极少,显微组织也难显示,故一般均忽略不计。共析钢显微组织如图 3-6 所示。



图 3-6 共析钢显微组织

## 2. 亚共析钢冷却过程分析

亚共析钢是碳的质量分数为  $0.0218\% < w_C < 0.77\%$  的铁碳合金。自高温缓冷至  $AC$  线时,液相中开始结晶出奥氏体。随着温度下降,奥氏体不断增加,液体不断减少,奥氏体和液相的成分分别沿  $AE$  线和  $AC$  线变化。冷至  $AE$  线,液体全部结晶为奥氏体,再缓冷至  $GS$  线,奥氏体中开始析出铁素体。随着温度下降,铁素体不断增加,其成分沿  $GP$  线变化。当温度降至  $PSK$  线时,剩余的奥氏体成分都变为  $w_C = 0.77\%$ ,并在此温度发生共析转变,奥氏体转变为珠光体,形成铁素体加珠光体( $F+P$ )的组织,一直到室温组织不再变化。其转变过程可表示为

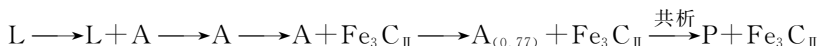


冷却过程中,对于铁素体在低温析出的三次渗碳体也忽略不计。

亚共析钢的室温组织都是铁素体和珠光体,但由于合金成分不同,组织中的铁素体和珠光体的相对量也不同。随着碳含量增加,珠光体量增加而铁素体减少,性能表现为强度、硬度提高。在金相显微组织中,白色部分为铁素体,黑色部分为珠光体,如图 3-7 所示。一般可以从金相显微组织中珠光体所占面积的大小来估计亚共析钢的碳含量和性能。

## 3. 过共析钢冷却过程分析

过共析钢是碳的质量分数为  $0.77\% < w_C \leq 2.11\%$  的铁碳合金。自高温缓冷至  $AC$  线时,液相中开始结晶出奥氏体。随温度下降,奥氏体不断增加而液体不断减少,其成分分别沿  $AE$  线和  $AC$  线变化。冷至  $AE$  线,液体全部结晶为奥氏体,再冷至  $ES$  线,奥氏体中开始析出二次渗碳体( $Fe_3C_{II}$ )。温度继续下降,二次渗碳体析出量增加而奥氏体减少,奥氏体成分沿  $ES$  线变化。冷至  $PSK$  线( $727^\circ C$ ),剩余奥氏体成分变为  $w_C = 0.77\%$ ,并在此温度发生共析转变,奥氏体转变为珠光体,形成的珠光体和二次渗碳体的组织,一直到室温不再变化。显微组织如图 3-8 所示。其冷却转变过程可表示为



同样,低温转变过程析出的三次渗碳体也忽略不计。

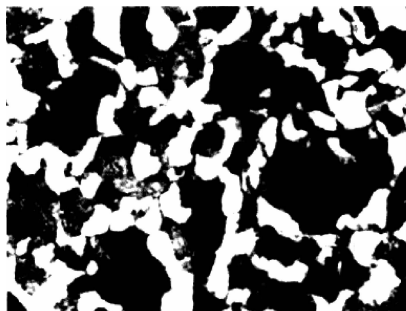


图 3-7 亚共析钢显微组织

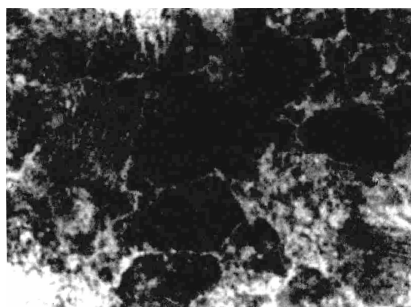


图 3-8 过共析钢显微组织

## 4. 共晶白口铸铁冷却过程分析

共晶白口铸铁是碳的质量分数  $w_C = 4.3\%$  的铁碳合金。高温时液态( $L$ ),缓冷至  $ECF$  线( $1148^\circ C$ ), $w_C = 4.3\%$  的液体( $L_C$ )发生共晶转变,同时析出奥氏体和渗碳体,形成莱氏体( $L_d$ )。随着温度继续下降,奥氏体成分沿  $ES$  线变化,不断析出二次渗碳体,冷至  $PSK$  线( $727^\circ C$ )时,奥氏体成分变为  $w_C = 0.77\%$ ,并发生共析转变,奥氏体变为珠光体。这样,由奥

氏体和渗碳体组成的莱氏体组织转变为由珠光体和渗碳体组成的变态莱氏体(Ld')。室温下共晶白口铸铁显微组织如图 3-9 所示。图中黑色部分为珠光体,白色基体为渗碳体。其冷却转变过程可表示为

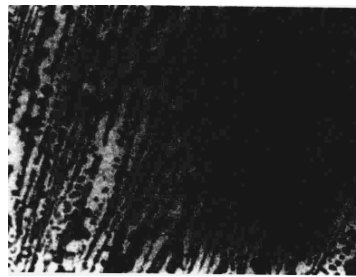
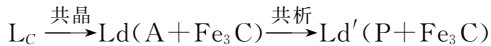
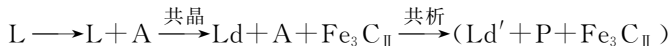


图 3-9 共晶白口铸铁显微组织

### 5. 亚共晶白口铸铁和过共晶白口铸铁冷却过程分析

在亚共晶白口铸铁(2.11% < w<sub>C</sub> ≤ 4.3%)和过共晶白口铸铁(4.3% < w<sub>C</sub> ≤ 6.69%)的冷却转变过程中,关键的转变也和共晶白口铸铁一样,是冷却至 ECF 线时的共晶转变和冷却至 PSK 线时的共析转变。亚共晶白口铸铁如图 3-10 所示,图中黑色点状、树枝状为珠光体,黑白相间的基体为变态莱氏体,二次渗碳体与共晶渗碳体在一起难以分辨。过共晶白口铸铁如图 3-11 所示,图中白色板条状为一次渗碳体,基体为变态莱氏体。其冷却转变过程可分别表示为

亚共晶白口铸铁



过共晶白口铸铁

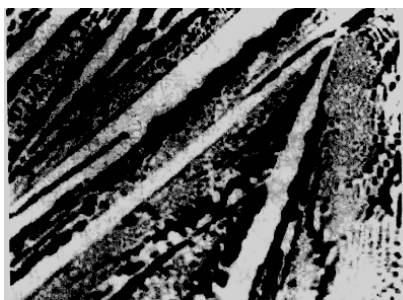
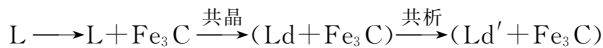


图 3-10 亚共晶白口铸铁显微组织

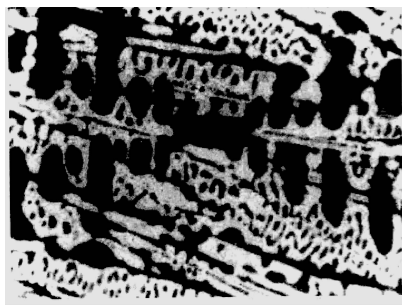
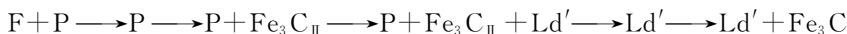


图 3-11 过共晶白口铸铁显微组织

## 3.2.3 铁碳合金成分、组织与性能的关系

### 1. 平衡组织与成分的关系

从铁碳合金相图和不同成分合金冷却转变过程的分析可知,不同成分的合金在室温时有不同的平衡组织,随着铁碳合金中碳含量的增加,合金组织变化如下:



随着碳含量的增加,组织中的铁素体相对量逐渐减少,而渗碳体的相对量逐渐增加,同时渗碳体的形态和分布也在变化,形成不同的组织特征。在这些组织中,直接从奥氏体转变形成的铁素体,通常为多边形块状,而共析转变产生的铁素体,由于受同时析出的渗碳体的制约,呈片层状。直接从液体结晶析出的一次渗碳体,通常为长条状;而从奥氏体中析出的二次渗碳体,沿奥氏体晶界结晶,呈网状,故称网状渗碳体;三次渗碳体也沿晶界析出,但数量少,呈细小片状。各种组织的组成相都是铁素体和渗碳体,但因其形态和分布不同,性能

有较大的差异。

## 2. 成分、组织对力学性能的影响

铁碳合金的室温组织,随着碳含量增加,铁素体减少,而渗碳体增加,其力学性能的变化如图 3-12 所示。

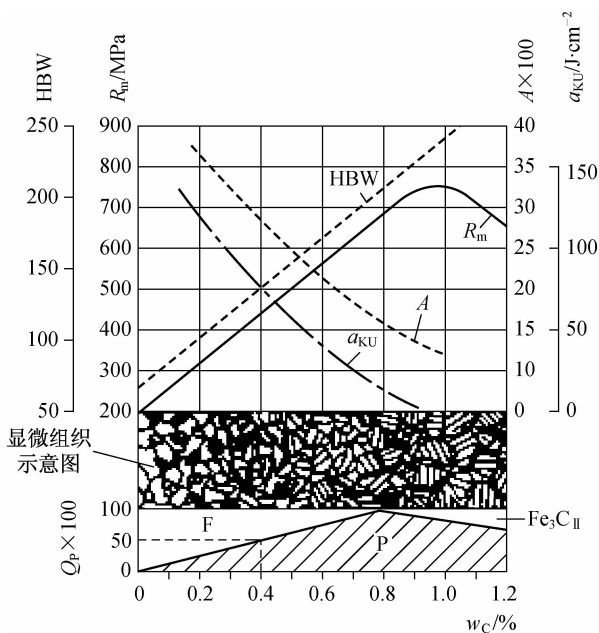


图 3-12 碳含量对钢组织性能的影响

当  $w_C < 0.9\%$  时,碳含量增加,合金的强度、硬度直线上升,塑性、韧性下降;而当  $w_C > 0.9\%$  时,由于网状渗碳体( $\text{Fe}_3\text{C}_{II}$ )的生成,塑性、韧性急剧下降,强度也明显变差。因此,当碳的质量分数  $w_C = 1.3\% \sim 1.4\%$  时,已不能保证工程使用。当  $w_C > 2.11\%$  时,白口铸铁组织中的渗碳体更多,性能硬而脆,不能进行锻压,切削加工困难,工业一般很少使用。

## 3. Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图的应用

### 1) 选材方面的应用

Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图表明了组织随温度、成分变化的规律,根据组织可大致判断合金的力学性能,便于合理选材。例如,型材和建筑结构用材,要求有良好的塑性、韧性和一定的强度,可选用  $w_C < 0.25\%$  的钢;对于承受冲击载荷和强度、塑性和韧性要求都较高的机械零件,可选用  $w_C = 0.25\% \sim 0.55\%$  的钢;对于各种工模具,要求高硬度且耐磨,可选用  $w_C > 0.55\%$  的钢。一些形状复杂,不受冲击且要求耐磨的拔丝模、冷轧辊、犁铧等工件,可考虑用白口铸铁铸造。

### 2) 金属加工工艺方面的应用

(1) 铸造工艺应用。根据 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图,可确定合适的铸造浇注温度,一般选择液相线以上  $50 \sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 。此外,根据相图可知,共晶成分的合金结晶温度最低,结晶过程的温度区间最小,因此铸造时流动性好、分散缩孔少,铸件组织致密,所以在铸造生产中广泛应用共晶成分或接近共晶成分的铸铁。

(2) 锻压工艺应用。碳钢在室温时均为铁素体和渗碳体的两相组织,塑性不如单相组织



好,而加热到奥氏体区后可转变为单相组织,塑性明显提高,有利于压力加工。因此,钢材锻压轧制时,坯料一般都加热到单相的奥氏体区。一般情况下,温度高则塑性好,但也不宜过高,以免氧化和晶粒粗大,所以,一般始锻温度控制在固相线下  $100\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。终锻温度不能过低,以免塑性变差和加工硬化不能消除,加工变形会产生裂纹。对于共析钢和亚共析钢,终锻温度一般稍高于  $GS$  线;过共析钢一般控制在稍高于  $PSK$  线( $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的温度范围内。

(3)热处理工艺应用。根据  $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$  相图可知,固态铁碳合金在加热和冷却过程中均有相变;同时也可看出,碳在奥氏体等组织中的溶解度随温度升高而增大。所以,可以通过加热、保温、冷却对钢和铸铁进行退火、正火、淬火、回火等普通热处理和渗碳等化学热处理。在后面的章节中,将专门详细介绍相图在热处理工艺方面的应用。

最后还应说明, $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$  相图是平衡相图,即反映的是在缓慢加热或冷却的条件下铁碳合金的相组织状况,没有反映时间的影响。在实际生产工作中,很少是极缓慢的加热和冷却,因此仅用平衡相图不能准确分析解决实际生产的具体问题。同时, $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$  相图只反映了铁碳二元合金系的相平衡关系,而实际使用的钢和铸铁往往含有或有意加入其他元素,必然影响相组织平衡关系。所以有必要强调的是: $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$  相图反映的是平衡条件下的相变、相组织、相成分和相的相对关系,对于实际生产中的相组织及其成分的相对关系,不能准确地定量地反映;但是相图对于实际生产有重要的规律性和基础性的指导意义。

## 习 题 3

**3-1** 铁碳合金中有哪些基本组织? 哪些是基本相? 试分析  $T10(w_C=1\%)$  钢冷却时的组织转变。

**3-2** 根据铁碳合金碳含量和室温组织,对其分类,并简述其基本力学性能。

**3-3** 什么是铁碳合金相图?

**3-4** 说明铁碳合金相图中的特性点和特性线的意义。

**3-5** 说明碳钢中含碳量变化对力学性能的影响。

**3-6** 简述铁碳合金相图的应用。

**3-7** 结合铁碳合金相图说明产生下列现象的原因:

(1)  $w_C=1\%$  的钢比  $w_C=0.5\%$  的钢硬度高。

(2)  $w_C=1.2\%$  的钢比  $w_C=0.6\%$  的钢强度高。

(3) 捆扎物体的铁丝一般都用低碳钢,而吊车用的钢缆却用中碳钢。

# 第 6 章 低合金钢与合金钢

## 知识目标

- ✧ 准确认识低合金钢与合金钢的关系和区别,以及合金元素在钢中的作用;
- ✧ 掌握低合金钢与合金钢的分类、性能、热处理和应用。

## 技能目标

- ✧ 理解低合金钢与合金钢的分类、性能、热处理和应用之间的一般关系;
- ✧ 积累典型材料、零件、热处理方法和应用之间的感性知识,做到由繁到简,由难到易,由书本知识到实践经验的转化。

低合金钢与合金钢是指为改善钢的组织、性能,在冶炼时特意加入合金元素的钢。这类钢具有良好的热处理工艺性能、综合力学性能,并有特殊的物理、化学性能,组织和性能的可调节性强,因此,虽然其生产工艺复杂、成本较高,但是应用范围依然不断扩大,重要的工程结构和机械零件广泛使用低合金钢或合金钢制造。

## 6.1 合金元素在钢中的作用

现代工业生产中,改善金属材料的力学性能,主要有两种途径,除了第 5 章介绍的热处理方法,另一种是调整钢的化学成分,加入合金元素,即合金化的方法。

### 6.1.1 钢中常见的合金元素

低合金钢与合金钢是在碳钢的基础上,为了改善其性能,有目的地加入某些元素而得到的多元合金。与碳钢相比,其性能有显著的提高,因此应用非常广泛。

钢中常见的合金元素有铬、钼、钨、钒、钛、铌、锰、镍、铝、钴、铜和稀土元素等。

### 6.1.2 合金元素在钢中存在的状态

#### 1. 合金铁素体

几乎所有合金元素都可以或多或少地溶入铁素体中,形成合金铁素体。其中原子直径很小的合金元素,如氮(N)、硼(B)等,与铁形成间隙固溶体;原子直径较大的合金元素,如锰(Mn)、镍(Ni)、钴(Co)等,与铁形成置换固溶体。合金元素在溶入铁素体后,由于它与铁的

晶格类型和原子半径有差异,必然引起铁素体晶格畸变,使铁素体的强度、硬度提高,但塑性、韧性却有下降趋势,即固溶强化。

## 2. 合金碳化物

在钢中能形成碳化物的元素有锰、铬、钼、钨、钒、铌、锆、钛等(按照与碳的亲合力由弱到强,依次排列)。其中钒、铌、锆、钛为强碳化物形成元素,铬、钼、钨为中强碳化物形成元素,锰为弱碳化物形成元素。钢中形成的合金碳化物的类型主要有合金渗碳体和特殊碳化物两类。

### 1) 合金渗碳体

合金渗碳体是合金元素溶入渗碳体(置换其中铁原子)而形成的化合物。锰一般溶入渗碳体中,形成合金渗碳体 $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ ;当中强碳化物形成元素在钢中的质量分数不大( $w = 0.5\% \sim 3\%$ )时,一般也倾向于形成合金渗碳体,如 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 、 $(\text{Fe}, \text{W})_3\text{C}$ 等。

合金渗碳体具有渗碳体的复杂晶格,比铁渗碳体略为稳定,硬度也较高,是一般低合金钢中碳化物的主要存在形式。

### 2) 特殊碳化物

特殊碳化物有两种类型:一种是具有简单晶格的间隙相碳化物,如 $\text{WC}$ 、 $\text{Mo}_2\text{C}$ 、 $\text{VC}$ 、 $\text{TiC}$ 等;另一种是具有复杂晶格的碳化物,如 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 、 $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 等。强碳化物形成元素,只有当其质量分数较高( $w > 5\%$ )时,才倾向于形成特殊碳化物。



小  
提  
示

特殊碳化物是与渗碳体晶格完全不同的合金碳化物,特殊碳化物特别是间隙相碳化物,比合金渗碳体具有更高的熔点、硬度和更好的耐磨性,并且更为稳定,不易分解。

## 3. 非金属夹杂物

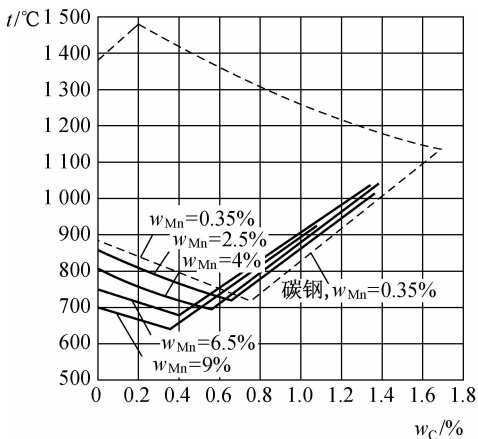
大多数元素与钢中的氧、氮、硫可形成简单的或复合的非金属夹杂物,如 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{AlN}$ 、 $\text{TiN}$ 等。非金属夹杂物的存在会降低钢的质量。

## 6.1.3 合金元素对相图的影响

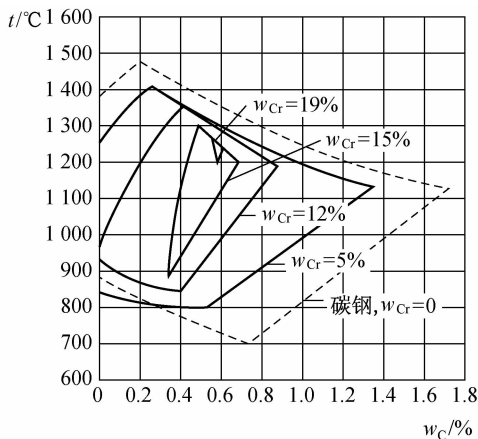
### 1. 改变奥氏体区的范围

合金元素以两种方式对奥氏体区产生影响。铌、钽、锰等元素的加入使奥氏体区扩大,GS线向左下方移动,使 $A_3$ 及 $A_1$ 温度下降,如图6-1(a)所示;而铬、钨、钼、钒、钛、铝、硅等元素则会缩小奥氏体区,GS线向左上方移动,使 $A_3$ 及 $A_1$ 温度升高,如图6-1(b)所示。

若钢中含有大量扩大奥氏体区的元素,便会使相图中奥氏体区一直延展到室温以下,此时,即使在室温下也会获得稳定的单相奥氏体,这类钢称为奥氏体钢。当钢中加入大量缩小奥氏体区的元素时,可能会使奥氏体区完全消失,此时,钢在室温下的平衡组织是单相的铁素体,这类钢称为铁素体钢。



(a)Fe-C-Mn系



(b)Fe-C-Cr系

图 6-1 合金元素对 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图奥氏体区的影响

## 2. 改变 S、E 点的位置

由图 6-1 可见,凡能扩大奥氏体区的元素,均使 S、E 点向左下方移动;凡能缩小奥氏体区的元素,均使 S、E 点向左上方移动。大多数合金元素均使 S、E 点左移,分别如图 6-2 与图 6-3 所示。S 点向左移动,意味着降低了共析点的含碳量,使含碳量相同的碳钢与合金钢具有不同的显微组织。如  $w_C=0.4\%$  的碳钢具有亚共析组织,但加入铬后( $w_{Cr}=14\%$ ),因 S 点左移,使该合金钢具有过共析钢的平衡组织。E 点左移,莱氏体的含碳量降低,如高速钢  $w_C<2.11\%$ ,但在铸态组织中却出现合金莱氏体,这类钢称为莱氏体钢。



**小提示**

由于合金元素的影响,要判断合金钢是亚共析钢还是过共析钢,以及确定其热处理加热或缓冷时的相变温度,就不能单纯地直接根据铁碳相图判断,而应根据多元铁基合金系相图来进行分析。

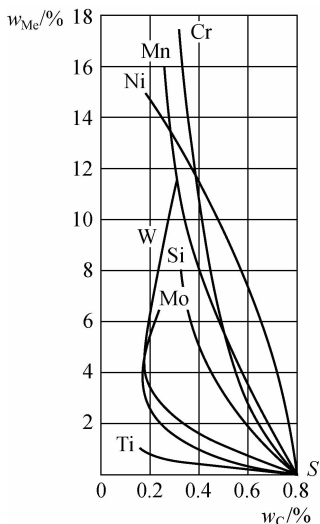


图 6-2 合金元素对 S 点含碳量的影响

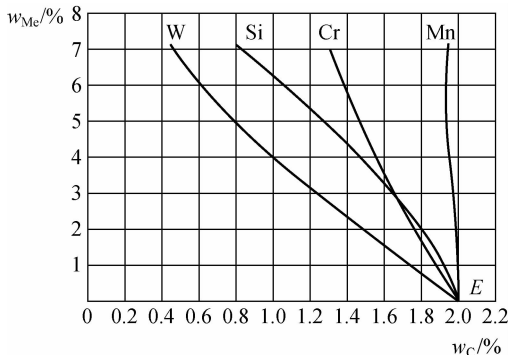


图 6-3 合金元素对 E 点含碳量的影响

## 6.1.4 合金元素对钢性能的影响

### 1. 锰的影响

锰在炼钢过程中是良好的脱氧剂和脱硫剂,一般钢中锰的质量分数为 $0.3\% \sim 0.5\%$ 。在碳钢中加入质量分数为 $0.7\%$ 以上的锰称为锰钢。相对于一般钢,锰钢不但有足够的韧性,而且具有较高的强度和硬度以及良好的热加工性能。锰含量的提高,能够增强钢的耐磨性,但是同时,锰含量的提高降低了钢的耐蚀性和焊接性能。

### 2. 硅的影响

硅在炼钢过程中被作为还原剂和脱氧剂。硅合金钢中硅的质量分数一般为 $0.5\% \sim 0.6\%$ 。硅能显著提高钢的弹性极限、屈服强度和抗拉强度,故被广泛用来制造弹簧钢。硅、铝、钨、铬等元素结合,有提高耐蚀性和抗氧化性的作用,可用来制造耐热钢。 $w_{Si} = 1\% \sim 4\%$ 的低碳钢,具有极高的导磁率,通常用于电器工业中制造硅钢片。硅含量增加,会降低钢的焊接性能。

### 3. 铬的影响

铬能显著提高钢的强度、硬度和耐磨性,但同时降低钢的塑性和韧性。铬还能提高钢的抗氧化性和耐蚀性,铬是不锈钢和耐热钢的重要合金元素。

### 4. 镍的影响

镍能提高钢的强度,而又保持良好的塑性和韧性。镍对酸碱有较高的耐蚀性,在高温下有防锈和耐热能力。但由于镍是较稀缺的资源,故在合金钢中应尽量采用其他合金元素代替镍元素。

### 5. 钼的影响

钼能使钢的晶粒细化,提高淬透性和热加工性能,并在高温时能够保持足够的强度,具有良好的抗高温蠕变能力(钢长期在高温下受到应力,发生缓慢的变形,称为蠕变),所以高温部件中经常采用含钼的合金钢。结构钢中加入钼,不仅能提高力学性能,还可以抑制合金钢由于淬火而引起的脆性。

### 6. 钛的影响

钛是钢生产中的脱氧剂。它能使钢的内部组织致密,细化合金的晶粒结构,同时还能够改善其焊接性能。钛合金具有良好的耐蚀性,经常用于制造各种器皿和仪器。由于其具有高强度、低密度的特点,钛合金在航空领域中用途十分广泛。

### 7. 钨的影响

钨的熔点高,密度大,是贵重的合金元素。钨与碳形成碳化钨,它有很高的硬度和耐磨性。通常在工具钢中加入钨,可显著提高钢的硬度和耐热性,用于切削工具及锻模具。

### 8. 铝的影响

铝是钢生产中比较常用的脱氧剂。钢中加入少量的铝,可细化晶粒,提高冲击韧性,含铝钢常用于经常受冲击载荷的机械部件的生产中。铝还具有抗氧化性和耐蚀性。在钢中添加适量的铝与铬、硅元素,可使钢在高温状态下不起皮,还能提高钢的耐高温、耐蚀性。铝的

缺点是影响钢的热加工性能、焊接性能和切削加工性能。

## 6.2 低合金钢与合金钢的分类、命名及牌号

### 6.2.1 低合金钢与合金钢的分类

#### 1. 低合金钢

一般所加的合金元素的质量分数低于5%的合金称为低合金钢。低合金钢有多种分类方法。

##### 1) 按主要质量等级分类

低合金钢按主要质量等级可分为普通质量低合金钢、优质低合金钢和特殊质量低合金钢三种。

(1) 普通质量低合金钢。普通质量低合金钢指不规定在生产过程中需要特别控制质量要求的仅作一般用途的低合金钢。

普通质量低合金钢主要包括一般用途低合金结构钢(如09MnV)、低合金钢筋钢(如20MnSi)、铁道用一般低合金钢(如低合金轻轨钢45SiMnP)和矿用一般低合金钢(调质处理的钢号除外),如20MnK、25MnK等。

(2) 优质低合金钢。优质低合金钢指除普通低合金钢和特殊质量低合金钢以外的低合金钢。

优质低合金钢主要包括可焊接的低合金高强度钢,锅炉和压力容器用低合金钢、造船用低合金钢、桥梁用低合金钢、低合金耐候钢、铁道用低合金钢、铁路用异型钢和起重机用低合金钢等。

(3) 特殊质量低合金钢。特殊质量低合金钢指在生产过程中需要特别严格控制质量和性能(特别是严格控制硫、磷等杂质含量和纯净度)的低合金钢。

特殊质量低合金钢主要包括核能用低合金钢、保证厚度方向性能低合金钢、铁道合金车轮钢、低温用低合金钢和舰船兵器等专用特殊低合金钢等。

##### 2) 按主要性能及使用特性分类

低合金钢按主要性能及使用特性分类,可分为可焊接的低合金高强度结构钢、低合金耐候钢、低合金钢筋钢、铁道用低合金钢、矿用低合金钢和其他低合金钢等。

#### 2. 合金钢

合金钢中合金元素的规定质量分数界限值总量 $w_{Me} \geq 5.43\%$ ,并且合金钢是按其主要质量等级、主要性能或使用特性、合金元素的种类分类的。

##### 1) 按主要质量等级分类

合金钢按主要质量等级可分为优质合金钢和特殊质量合金钢。

(1) 优质合金钢。优质合金钢指在生产过程中需要特别控制质量和性能的合金钢,但其生产控制和质量要求不如特殊质量合金钢严格。

优质合金钢主要包括一般工程结构用合金钢、合金钢筋钢, 不规定磁导率的电工用硅钢, 铁道用合金钢, 地质、石油钻探用合金钢, 耐磨钢和硅锰弹簧钢。

(2) 特殊质量合金钢。特殊质量合金钢指在生产过程中需要特别严格控制质量和性能的合金钢。除优质合金钢以外的所有其他合金钢都为特殊质量合金钢。

### 2) 按主要性能及使用特性分类

合金钢按主要性能及使用特性可分为合金结构钢、合金工具钢和特殊性能钢。

(1) 合金结构钢。合金结构钢是建筑及工程用钢, 包括合金结构钢、钢筋钢等; 机械制造用钢, 包括合金渗碳钢、调质钢、弹簧钢和滚动轴承钢等。

(2) 合金工具钢。合金工具钢是用于制造各种工具(刀具、模具和量具等)的钢, 包括合金刀具钢和高速工具钢等。

(3) 特殊性能钢。特殊性能钢是具有特殊物理、化学性能或力学性能的钢, 包括不锈钢、耐热钢、耐磨钢、软磁钢、永磁钢和无磁钢等。

### 3) 按钢中合金元素的种类分类

合金钢按钢中合金元素的种类分为铬钢、锰钢、铬锰钢、铬镍钢、硅锰钢和锰钒钢等。

## 6.2.2 低合金钢与合金钢的命名及牌号

### 1. 低合金钢的命名及牌号

低合金钢的牌号通常由四部分组成:

第一部分: 代表屈服点的字母“Q”。

第二部分: 屈服强度的数值(以  $\text{N}/\text{mm}^2$  或 MPa 为单位)。

第三部分(必要时): 钢的质量等级, 用英文字母 A、B、C、D 分别表示四个级别, D 级最高。

第四部分(必要时): 脱氧方式表示符号, 即沸腾钢、半镇静钢、镇静钢、特殊镇静钢分别以“F”、“b”、“Z”、“TZ”表示。镇静钢、特殊镇静钢表示符号通常可以省略。

如 Q390A, 其中 Q 为钢材屈服点“屈”字汉语拼音首位字母, 390 为屈服强度数值不小于 390 MPa, A 为质量等级符号。

根据需要, 低合金钢的牌号也可以采用两位阿拉伯数字(表示碳的平均质量分数, 以万分之几计)加规定的元素符号及必要时加代表产品用途、特性和工艺方法的表示符号(见表 6-1), 按顺序表示。

如碳的质量分数为 0.15%~0.26%, 锰的质量分数为 1.20%~1.60% 的矿用钢, 牌号为 20MnK。

表 6-1 低合金钢产品用途、特性和工艺方法的表示符号

产品名称	采用的汉字及汉语拼音或英文单词			采用字母	位置
	汉字	汉语拼音	英文单词		
锅炉和压力容器用钢	容	RONG	—	R	牌号尾
锅炉用钢(管)	锅	GUO	—	G	牌号尾
低温压力容器用钢	低容	DI RONG	—	DR	牌号尾

续表

产品名称	采用的汉字及汉语拼音或英文单词			采用字母	位 置
	汉 字	汉语拼音	英文单词		
桥梁用钢	桥	QIAO	—	Q	牌号尾
耐候钢	耐候	NAI HOU	—	NH	牌号尾
高耐候钢	高耐候	GAO NAI HOU	—	GNH	牌号尾
汽车大梁用钢	梁	LIANG	—	L	牌号尾
高性能建筑结构用钢	高建	GAO JIAN	—	GJ	牌号尾
低焊接裂纹敏感性钢	低焊接裂纹敏感性	—	Crack Free	CF	牌号尾
保证淬透性钢	淬透性	—	Hardenability	H	牌号尾
矿用钢	矿	KUANG	—	K	牌号尾

## 2. 合金钢的命名及牌号

我国合金钢的编号是按照合金钢中碳的质量分数及所含合金元素的种类和其质量分数来编制的。

### 1) 合金结构钢和合金弹簧钢

合金结构钢牌号通常由三部分组成：

第一部分：以两位阿拉伯数字表示碳的质量分数(以万分之几计)。

第二部分：合金元素含量，以化学元素符号及阿拉伯数字表示。具体表示方法为：平均质量分数小于 1.5% 时，牌号中仅标明元素，一般不标明质量分数；平均质量分数为 1.5% ~ 2.49%、2.5% ~ 3.49%、3.5% ~ 4.49%... 时，在合金元素后相应写成 2、3、4...

第三部分：钢材冶金质量，即高级优质钢、特级优质钢分别以 A、E 表示，优质钢不用字母表示。

如 25Cr2MoVA，表示  $w_C = 0.22\% \sim 0.29\%$ ， $w_{Cr} = 1.5\% \sim 1.8\%$ ， $w_{Mo} = 0.25\% \sim 0.35\%$ ， $w_V = 0.15\% \sim 0.3\%$ ，冶金质量为高级优质的合金结构钢。

合金弹簧钢表示方法与合金结构钢相同。如 60Si2Mn，表示  $w_C = 0.56\% \sim 0.64\%$ ， $w_{Si} = 1.6\% \sim 2\%$ ， $w_{Mn} = 0.7\% \sim 1\%$ ，冶金质量为优质的弹簧钢。

### 2) 轴承钢

轴承钢分为高碳铬轴承钢、渗碳轴承钢、高碳铬不锈钢和高温轴承钢四大类。

(1) 高碳铬轴承钢。通常由两部分组成：

第一部分：(滚珠)轴承钢表示符号“G”，但不标明碳含量。

第二部分：合金元素“Cr”符号及其质量分数(以千分之几计)。其他合金元素的质量分数，以化学元素符号及阿拉伯数字表示，表示方法同合金结构钢第二部分。

如 GCr15SiMn，表示  $w_{Cr} = 1.4\% \sim 1.65\%$ ， $w_{Si} = 0.45\% \sim 0.75\%$ ， $w_{Mn} = 0.95\% \sim 1.25\%$  的高碳铬轴承钢。

(2) 渗碳轴承钢。在牌号头部加符号“G”，采用合金结构钢的牌号表示方法。高级优质渗碳轴承钢，在牌号尾部加“A”。如  $w_C = 0.17\% \sim 0.23\%$ ， $w_{Cr} = 0.35\% \sim 0.65\%$ ， $w_{Ni} = 0.4\% \sim 0.7\%$ ， $w_{Mo} = 0.15\% \sim 0.3\%$  的高级优质渗碳轴承钢，其牌号表示为



“G20CrNiMoA”。

(3)高碳铬不锈钢和高温轴承钢。高碳铬不锈钢和高温轴承钢在牌号头部加符号“G”，分别采用不锈钢和耐热钢的牌号表示方法。如  $w_C = 0.9\% \sim 1\%$ ,  $w_{Cr} = 17\% \sim 19\%$  的高碳铬不锈钢，其牌号表示为 G95Cr18;  $w_C = 0.75\% \sim 0.85\%$ ,  $w_{Cr} = 3.75\% \sim 4.25\%$ ,  $w_{Mo} = 4\% \sim 4.5\%$  的高温轴承钢，其牌号表示为 G80Cr4Mo4V。

### 3)合金工具钢

合金工具钢牌号通常由两部分组成：

第一部分：碳的平均质量分数小于 1% 时，采用一位阿拉伯数字表示质量分数（以千分之几计）。碳的平均质量分数不小于 1% 时，不标明含碳量数字。

第二部分：合金元素的质量分数，以化学元素符号及阿拉伯数字表示，表示方法同合金结构钢第二部分。低铬（铬的平均质量分数小于 1%）合金工具钢，在质量分数（以千分之几计）前加数字“0”。

如  $w_C = 0.85\% \sim 0.95\%$ ,  $w_{Si} = 1.2\% \sim 1.6\%$ ,  $w_{Cr} = 0.95\% \sim 1.25\%$  的合金工具钢，其牌号表示为 9SiCr。



**小提示**

高速工具钢牌号表示方法与合金结构钢相同，但在牌号头部一般不标明表示碳含量的阿拉伯数字（为了区别牌号，在牌号头部可以加“C”表示高速工具钢）。如  $w_C = 0.8\% \sim 0.9\%$ ,  $w_W = 5.5\% \sim 6.75\%$ ,  $w_{Mo} = 4.5\% \sim 5.5\%$ ,  $w_{Cr} = 3.8\% \sim 4.4\%$ ,  $w_V = 1.7\% \sim 2.2\%$  的高速工具钢，其牌号表示为 W6Mo5Cr4V2。

### 4)特殊性能钢

特殊性能钢的牌号表示方法与合金工具钢基本相同。例如，不锈钢 2Cr13 表示平均含碳量为 0.2%，含铬量为 13%；若含碳量小于或等于 0.08%，用“0”表示，如 0Cr18Ni9；若含碳量小于或等于 0.03%，则用“00”表示，如 00Cr12。

### 5)专用合金结构钢

专用合金结构钢在牌号头部（或尾部）加上代表该钢用途的符号。牌号头部的“H”、“Y”、“GH”分别表示“焊接”、“易切削”、“高温合金”，如 H08CrMoA 表示高级优质焊接合金结构钢。牌号尾部的“C”、“R”、“Q”、“K”分别表示“船用”、“压力容器”、“桥梁”、“矿用”，如 18MnMoNbER 表示特级优质压力容器用钢。

## 6.3 工程结构用钢

工程结构用钢主要用于建筑、桥梁、船舶、锅炉或其他工程上制作金属的构件。这类钢也大多为低碳钢，因为它们多数要经过焊接施工，含碳量不宜过高，一般都是在热轧供应或正火状态下使用。其主要有碳素结构钢（见第 4 章），低合金钢等。

### 6.3.1 低合金高强度结构钢

低合金高强度结构钢是建筑及工程用结构钢中的主要钢种,它与非合金钢相比,有较高的强度、足够的塑性和韧性,同时拥有良好的焊接性和耐蚀性。

低合金高强度结构钢碳的质量分数较低,一般小于 0.20%;合金元素质量分数较低,其主加元素为锰,辅加元素为钒、钛、铌、铬、铝、镍等。锰的作用是固溶于铁素体产生固溶强化,增加并细化珠光体;钒、钛、铌等元素既可细化晶粒,提高强度和韧性,又能改善焊接性能,降低冷脆转变温度;铬、铌可提高钢的冲击韧性,改善钢的热处理性能,提高钢的强度,并且铬、铌均可提高钢对大气的抗蚀能力。

低合金高强度结构钢的常用牌号及用途见表 6-2。

表 6-2 低合金高强度结构钢的常用牌号及用途

新标准	旧标准	用 途
Q295	09MnV、09MnNb、09Mn2、12Mn	车辆冲压件、冷弯型钢、螺旋焊管、拖拉机轮圈、低压锅炉汽包、中低压化工容器、输油管道、储油罐、油船等
Q345	12MnV、14MnNb、16Mn、16MnRE	船舶、铁路车辆、桥梁、管道、锅炉、压力容器、石油储罐、起重及矿山机械、电站设备、厂房钢架等
Q390	15MnTi、16MnNb、10MnPNbRE、15MnV	中高压锅炉汽包、中高压石油化工容器、大型船舶、桥梁、车辆、起重机及其他较高载荷的焊接结构件等
Q420	15MnVN、14MnVTiRE	大型船舶、桥梁、电站设备、起重机械、机车车辆、中压或高压锅炉及容器的大型焊接结构等
Q460	—	可淬火加回火后用于大型挖掘机、起重运输机械、钻井平台等

### 6.3.2 低合金耐候钢

耐候钢是指耐大气腐蚀钢,它是在低碳非合金钢的基础上加入少量铜、铬、钼等合金元素,使其在金属表面形成一层保护膜的钢材。为了进一步改善性能,还可以加微量的铌、钛、钒、锆等元素。我国目前使用的耐候钢分为焊接结构用耐候钢和高耐候性结构钢两大类。

#### 1. 焊接结构用耐候钢

如 12MnCuCr 适用于桥梁、建筑及其他要求耐候性的钢结构。

#### 2. 高耐候性结构钢

如 09CuPCrNi-A 适用于机车车辆、建筑、塔架和其他要求高耐候性的钢结构。

### 6.3.3 其他低合金专业用钢

低合金专业用钢是在低合金高强度钢的基础上,对其成分、工艺、性能作相应调整,来适应某些专业的特殊需要。如锅炉、压力容器、船舶、桥梁和建筑钢筋等专用钢。

汽车用低合金钢是一类较大的专业用钢,如 06TiL、16MnL、09MnREL 等,主要用于制造汽车大梁、托架及车壳等结构件;矿用低合金钢主要用于矿用结构件,如 20MnK、20MnVK 等;铁道用低合金钢主要用于重轨、轻轨和异型钢,如 U71Cu、U71Mn、U71MnSi 等。

## 6.4 机械结构用合金钢

机械结构用合金钢主要用于制造机械零件,如轴、连杆、齿轮、弹簧、轴承等,按其用途和热处理特点可以分为合金渗碳钢、合金调质钢、合金弹簧钢和滚动轴承钢等。

### 6.4.1 合金渗碳钢

合金渗碳钢是表面硬化的合金结构钢,主要用于制造受冲击载荷和受到强烈的摩擦和磨损的条件下工作的零件,如汽车、拖拉机的变速齿轮、内燃机上的凸轮轴、活塞销等。其成分含碳量很低,碳的质量分数为 0.10%~0.25%,为了提高淬透性,加入铬、锰、镍、硼等元素并强化渗碳层和心部组织。此外,还加入微量的钼、钨、钒、钛等强碳化物形成元素。这些元素形成的稳定合金碳化物,除能防止渗碳时晶粒长大外,还能增加渗碳层硬度,提高耐磨性。合金渗碳钢的热处理过程一般都是经渗碳后直接淬火,再低温回火,形成表面高硬度、高耐磨性而心部具有足够的塑性和韧性的组织。

合金渗碳钢按淬透性的高低分为低淬透性钢、中淬透性钢和高淬透性钢三类,常用合金渗碳钢的类别、牌号及用途见表 6-3。

表 6-3 常用合金渗碳钢的类别、牌号及用途

类 别	牌 号	用 途
低淬透性钢	15Cr	截面不大、心部韧性比较高的受磨损零件,如齿轮、活塞环、小轴等
	20Cr	心部要求强度较高的小截面受磨损零件,如机床齿轮、蜗杆、凸轮等
	20MnV	齿轮、活塞销等
中淬透性钢	20Mn2	替代 20Cr,节约 Cr,制造小齿轮、小轴、活塞销、气门顶杆等
	20CrNi3	承受重载荷的齿轮、凸轮、机床主轴、传动轴等
	20CrMnTi	高速、承受冲击或重载荷的重要零件,如变速齿轮、凸轮等
	20CrMnMo	要求表面高硬度和耐磨损的重要渗碳件,如传动齿轮、牙轮钻头
高淬透性钢	20MnVB	替代 20CrMnTi,制造变速齿轮、重型机床的轴、齿轮等
	20Cr2Ni4	大截面的重要渗碳件,如大齿轮、轴、航天发动机齿轮、汽轮机轴
	18Cr2Ni4	大截面、高强度、高韧性的重要渗碳件,如大齿轮、传动轴、曲轴等

### 6.4.2 合金调质钢

在中碳钢的基础上加入一定量的合金元素经调质处理后获得良好的综合力学性能的钢称为合金调质钢。其中碳的质量分数一般为 0.25%~0.5%,常加入的合金元素有锰、硅、铬、镍、硼等,主要作用是提高钢的淬透性和保证良好的强度和韧性。

许多重要零件,如轴类、连杆、重要螺栓等,多是在承受很大的交变应力和冲击负荷等多种复合应力下工作,因此,要求有较高的强度和韧性的综合力学性能。为了达到上述要求,钢件必须经过淬火及高温回火处理(即调质处理),淬火处理得到马氏体组织,然后高温回火得到索氏体组织。合金调质钢中碳的质量分数为 0.3%~0.5%,若含碳量过低,则不易淬

硬,回火后得不到所需强度;含碳量过高则韧性低,在使用中易发生脆性断裂。常见合金调质结构钢的牌号、热处理、力学性能及用途见表 6-4。

表 6-4 常见合金调质结构钢的牌号、热处理、力学性能及用途

牌 号	试样 尺寸 /mm	热 处 理		力 学 性 能					用 途
		淬火温 度/℃和 冷却介质	回火温 度/℃和 冷却介质	$R_m$ /MPa	$R_{eL}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%	$a_K$ /(J/cm <sup>2</sup> )	
				不小于					
40Cr	25	850 油	520 水,油	980	785	9	45	60	重要调质件,如 轴、连杆螺栓、重 要齿轮、蜗杆等
40MnVB	25	850 油	520 水,油	980	785	10	45	60	
35CrMo	25	850 油	550 水,油	980	835	12	45	80	重要调质件,如 主轴、曲轴、连杆、 齿轮等
30CrMnSi	25	880 油	520 水,油	1 080	885	10	45	50	
40CrMnMo	25	850 油	600 水,油	980	785	10	45	80	高强度零件,如 航空发动机轴等
40CrNiMoA	25	850 油	600 水,油	980	835	12	55	100	

### 6.4.3 合金弹簧钢

合金弹簧钢主要用于制造各种重要的弹性元件,如机器、仪表中的弹簧。弹簧是一种利用弹性来工作的机械结构零件,通过弹簧的弹性变形,可以吸收冲击能量、缓和冲击和振动,因此,要求弹簧钢必须有高的强度,特别是高的屈服强度和疲劳强度,要不易脱碳,有良好的表面质量,具有一定的淬透性和良好的工艺性能。有的弹簧还要求耐热、耐腐蚀等,因此,弹簧钢含碳较高。

合金弹簧钢中碳的质量分数一般为 0.45%~0.70%。经常加入的合金元素有硅、锰,主要提高淬透性、回火稳定性,同时也提高屈强比,其中硅的作用最突出,但它热处理时促进表面脱碳,Mn 则使钢易于过热。因此,重要用途的弹簧钢,必须加入铬、钒、钨等元素以减少脱碳、过热倾向,并细化晶粒及进一步提高弹性极限、屈强比等,还有利于提高弹簧的高温强度。

弹簧钢按化学成分可分为碳素弹簧钢和合金弹簧钢两类,其牌号表示方法,前者基本上与优质碳素结构钢的相同,后者基本上与合金结构钢的相同。常用弹簧钢的牌号、热处理、力学性能及用途见表 6-5。

表 6-5 常用弹簧钢的牌号、热处理、力学性能及用途

牌 号	热 处 理		力 学 性 能					用 途	
	淬火温 度/℃和冷 却介质	回火 温度/℃	$R_m$ /MPa	$R_{eL}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%	$A_K$ /J		
			不小于						
碳素弹 簧钢	65	840 油	520	980	785	9	35	45	外径小于 15 mm 的小弹簧  外径小于 20 mm 的 冷卷弹簧、阀簧、离合 器弹簧片、刹车弹簧等
	65Mn	830 油	520	980	785	8	30	45	

续表

牌 号		热 处 理		力 学 性 能					用 途
		淬火温 度/℃和冷 却介质	回火 温度/℃	$R_m$ /MPa	$R_{eL}$ /MPa	A/%	Z/%	$A_K$ /J	
				不小于					
合金弹 簧钢	60Si2Mn	870 油	480	1 275	1 175	5	25	45	机车板簧、拖曳 弹簧、测力弹簧、 250℃以下使用的 弹簧等
	50CrVA	850 油	500	1 275	1 150	10	40	45	汽车板簧、300℃ 以下使用的耐热 弹簧、安全阀弹 簧等

#### 6.4.4 滚动轴承钢

滚动轴承钢主要用来制造各种滚动轴承的滚动体和内、外套圈。滚动轴承钢要求具有高而均匀的硬度和耐磨性、高的弹性极限和接触疲劳强度、足够的韧性和淬透性、一定的耐蚀性,因此,对钢的纯度(非金属夹杂物等)、组织均匀性、碳化物的分布情况及脱碳程度等都有严格的要求。

滚动轴承钢中碳的质量分数约为 0.95%~1.1%,高碳是为了保证钢经热处理后具有高硬度和耐磨性。在轴承钢中加入的合金元素是铬、锰、钛、钒等,作用是提高淬透性,细化晶粒和提高钢的回火稳定性和韧性并使组织均匀等。

滚动轴承钢的热处理工艺主要为球化退火、淬火和低温回火。球化退火是为了降低硬度,改善切削加工性能,并为淬火做好组织准备。淬火加热温度应严格控制,过高或过低均影响质量,淬火后进行低温回火,得到回火马氏体、分布均匀的细粒状碳化物及少量残余奥氏体,回火后硬度为 61~65 HRC。精密轴承淬火后在 -80~-60℃ 温度下进行冷处理,减少残余奥氏体量,消除内应力,以保证尺寸的稳定性;然后再回火和磨削加工,最后进行一次稳定尺寸的低温时效处理,在 120~130℃ 保温 5~10 h。

滚动轴承钢有很多种类,常用滚动轴承钢的类别、牌号及用途见表 6-6。

表 6-6 常用滚动轴承钢的类别、牌号及用途

类 别	牌 号	用 途
铬轴承钢	GCr9	$\phi 10 \sim \phi 20$ mm 的滚珠或滚针
	GCr15	壁厚小于 20 mm 的中小套管,直径大于 50 mm 的钢球
	GCr9SiMn	壁厚 30 mm 的大套管, $\phi 50 \sim \phi 100$ mm 的钢球
无铬轴承钢	GSiMnV	代替 GCr15
	GSiMnVRe	代替 GCr9SiMn

## 6.5 合金工具钢

合金工具钢具有更高的硬度、耐磨性,更好的淬透性、热硬性和回火稳定性等,因而可以制造刀具、模具、量具和其他工具。通常按用途分类,合金工具钢可以分为合金刀具钢、合金量具钢、合金模具钢、合金高速钢。

### 6.5.1 合金刀具钢

合金刀具钢主要用于制造各种刀具,如车刀、铣刀、钻头、丝锥、板牙等切削刀具。合金刀具钢刀具的任务就是将钢材或坯料通过切削,加工成工件。合金刀具钢中碳的质量分数约为 $0.8\% \sim 1.5\%$ ,钢中常加入的合金元素是铬、锰、硅、钒、钼等,作用是提高淬透性、回火稳定性和热硬性。常用合金刀具钢的牌号及用途见表 6-7。

表 6-7 常用合金刀具钢的牌号及用途

牌 号	用 途
9SiCr	板牙、丝锥、冷冲模、木工工具、低速切削刀具
Cr06	样板、铰刀、插刀、剃刀、刀片、刮刀、锉刀等
CrWMn	拉刀、冲模、样板、量规
W、W2、CrW	小麻花钻、低速切削刀具

合金刀具钢应具有如下性能:

- (1)高硬度。刀具的硬度应大大高于被切削材料的硬度,一般应在 60 HRC 以上。
- (2)高耐磨性。耐磨性直接影响刀具的使用寿命和加工效率。
- (3)高热硬性。高热硬性指刃部受热升温时,仍能维持高硬度的特征,又称为红硬性。



小  
提  
示

### 6.5.2 合金量具钢

合金量具钢中碳的质量分数为 $0.08\% \sim 1.45\%$ ,加入铬、锰、硅、钨等合金元素。铬、锰、硅提高了钢的淬透性,同时铬、硅还能提高回火稳定性。

为了保证量具的精确度,制造量具的钢应具有良好的尺寸稳定性、较高的硬度及耐磨性。合金量具钢用于制造各种测量工具,如卡尺、千分尺、量规、块规等。量具钢没有专用钢种,尺寸小、形状简单、精度较低的量具,用高碳钢制造;复杂的精密量具用低合金刀具钢制造;耐蚀性要求较高的量具用不锈钢等。常用合金量具钢的牌号及用途见表 6-8。

表 6-8 常用合金量具钢的牌号及用途

牌 号	用 途
T10、T12A、9SiCr	一般量规和量块

续表

牌 号	用 途
CrMn、GCr15	高精度量规和量块
CrWMn	高精度、形状复杂的量规和量块
4Cr13、9Cr18	抗蚀量具

### 6.5.3 合金模具钢

按照工作条件不同,模具钢可以分为冷模具钢和热模具钢两种。

#### 1. 冷模具钢

冷模具包括冷冲模、冷镦模、冷挤压模以及拉丝模、滚丝模、搓丝板等,属于接近室温状态下对金属进行变形加工的一种模具。冷模具钢要求有高的硬度和良好的耐磨性,以及足够的强度和韧性,热处理变形较小。小模具用 CrWMn 来制造,大型模具采用淬透性高、耐磨性好的 Cr12 钢来制造。

模具类钢的热处理过程是球化退火—淬火—低温回火。回火后组织是回火马氏体、合金碳化物和少量的残余奥氏体。常用冷模具钢的牌号及用途见表 6-9。

表 6-9 常用冷模具钢的牌号及用途

牌 号	用 途
Cr12	小动载、高耐磨、简单形状的拉伸机冲裁模
Cr12MoV	下料模、冲头、滚丝轮、冷镦模、剪刀片等
9SiCr	下料模、搓丝板、压印模、顶出杆、剪刀片等
6CrW2Si	重载铁板落料及剪刀片等

#### 2. 热模具钢

热模具是用于高温下使金属材料塑性成形的一类模具,如热锻模、热挤压模、热冲裁模和金属压铸模。这些模具工作在大的冲击载荷、强烈的摩擦、剧烈的冷热循环下,会引起热应变和热应力,还工作在高温氧化的环境下,所以,对热模具钢的性能要求为:具有高温耐磨性和热硬性、高的热强性和抗氧化性、足够的韧性和热疲劳抗力,淬透性好,热处理变形小。常见热模具钢的牌号及用途见表 6-10。

表 6-10 常见热模具钢的牌号及用途

牌 号	用 途
5CrNiMo	5CrNiMo 钢淬火后综合力学性能较好,热强性和淬透性一般,用于制造形状简单,工作温度一般,厚度在 250~350 mm 的中型热锤锻模
5CrMnMo	5CrMnMo 钢淬透性一般,价格较低,淬火后硬度和 5CrNiMo 钢相近,而塑性、韧性相对低一些,用于制造形状简单,厚度小于 250 mm 的小型热锤锻模
3Cr2W8V	3Cr2W8V 钢有较高的强度、硬度及回火稳定性,用于制造工作温度不低于 550 °C 并承受较高的静载荷,而冲击载荷较低的锻造压力机热锻模或热挤压模

续表

牌 号	用 途
5CrNiMoV	5CrNiMoV 钢淬透性、淬硬性较 5CrNiMo 钢、5CrMnMo 钢显著改善,用于制造厚度超过 350 mm,型腔复杂,受力较大的大型锤锻模或锻造压力机热锻模
3Cr3Mo3Nb	3Cr3Mo3Nb 钢是一种新型热模具钢,它具有高的热强性、高韧性和冷热疲劳性能,用该钢制作的镶块模在锻造耐热合金、耐热不锈钢时,其寿命是 5CrNiMo 钢制作模具的 5 倍
4Cr5Mo2MnVSi	4Cr5Mo2MnVSi 钢是针对铝合金压铸模具而研制的,与 3Cr2W8V 钢相比,该钢具有抗冷热疲劳性能好、热处理变形小、抗铝溶损性能好等优点,模具的使用寿命普遍比 3Cr2W8V 钢制造的模具的使用寿命提高一倍以上。该钢还可用于制造工作温度在 600 ℃ 以下的中小型热锻模具



小提示

热模具钢中碳的质量分数不高于 0.6%,并含有铬、镍、锰、硅、钼等合金元素。其中  $w_C = 0.3\% \sim 0.6\%$ ,以保证高强度、韧性、热疲劳抗力和较高的硬度,加入铬、镍、锰、硅是为了提高淬透性、回火稳定性和热疲劳抗力,钨、钼、钒是为了提高热硬性和热强性。这类钢的最终热处理为淬火及高温回火,组织为回火托氏体或回火索氏体。

#### 6.5.4 合金高速钢

高速切削过程中,刀具的刃部温度可达 600 ℃ 以上,低合金钢刀具已不能满足这种要求。因此,就必须选用合金高速钢(这是一种合金元素含量很高的刀具钢),它在 600 ℃ 时,仍能使硬度保持在 60 HRC 以上,从而保证其切削性和耐磨性。合金高速钢刀具的切削速度比碳素工具钢和合金工具钢刀具增加 1~3 倍,而耐用性增加 7~14 倍,因此,合金高速钢在机械制造业中被广泛地采用。

合金高速钢中含有大量的合金元素钨、钼、铬、钒等,使其具有高的硬度和耐磨性,较高的热硬性,足够的强度和韧性等。这些性能也要通过适当的热处理才能保证。合金高速钢的铸态组织中有粗大的鱼骨状合金碳化物,使钢的力学性能降低,但不能用热处理来消除,只有采用反复锻击的办法将其击碎,并使其均匀分布在基体上。合金高速钢锻造之后,要进行退火,以消除应力,降低硬度,为以后的淬火做组织上的准备。常用合金高速钢的牌号及用途见表 6-11。

表 6-11 常用合金高速钢的牌号及用途

牌 号	用 途
W18Cr4V	W18Cr4V 钢用于制造车刀、铣刀、刨刀、钻头、拉刀
W6Mo5Cr4V2	W6Mo5Cr4V2 钢因耐磨性和韧性好,用于制造丝锥、铰刀、钻头等

## 6.6 特殊性能钢

特殊性能钢是指具有特殊物理、化学性能的合金钢,如不锈钢、耐热钢、耐磨钢和特殊物



理性能钢等。

### 6.6.1 不锈钢

不锈钢通常指具有抵抗空气、水、酸、碱盐或其他介质腐蚀能力的钢。根据合金成分的不同,分别侧重不锈性和耐酸性,有些钢虽然具有不锈性,但不一定耐酸,而耐酸钢则通常具有不锈性。“不锈钢”是一种错误的名称,因为没有一种能够应付所有腐蚀环境可以不生锈的钢,不锈钢的真正含义只是“难生锈”而已。

按不锈钢正火(供应)状态的组织可分为马氏体型不锈钢、铁素体型不锈钢、奥氏体型不锈钢和奥氏体—铁素体型不锈钢和沉淀硬化型不锈钢。常用不锈钢的类别、牌号及用途见表 6-12。

表 6-12 常用不锈钢的类别、牌号及用途

类 别	牌 号	用 途
马氏体型不锈钢	1Cr13、2Cr13、3Cr13	马氏体型不锈钢用于制造汽轮机叶片、测量工具、不锈钢轴承、弹簧、手术器具及刀具
铁素体型不锈钢	1Cr17、1Cr25、1Cr28	铁素体型不锈钢用于制造化工设备、容器及管道
奥氏体型不锈钢	1Cr18Ni9Ti、0Cr18Ni9Ti 00Cr17Ni14Mo2	奥氏体型不锈钢用于制造耐蚀性要求较高的化工容器、管道、设备衬里以及医疗器械等
奥氏体—铁素体型不锈钢	1Cr12Ni5Ti	奥氏体—铁素体型不锈钢用于制造化工设备、热交换器
沉淀硬化型不锈钢	07Cr17Ni7Al、 09Cr17Ni5Mo3N	沉淀硬化型不锈钢用于制造核工业、航空航天工业设备

### 6.6.2 耐热钢

耐热钢指在高温下具有抗氧化性和热强性的钢。耐热钢按组织结构可以分为马氏体型耐热钢、铁素体型耐热钢、奥氏体型耐热钢、沉淀硬化性型耐热钢。常用耐热钢的类别、牌号、成分特点及用途见表 6-13。

表 6-13 常用耐热钢的类别、牌号、成分特点及用途

类 别	牌 号	成分特点	性 能	用 途	应用举例
奥氏体型耐热钢	4Cr14NiW2Mo	合金元素含量高	热强性、组织稳定性好	温度大于 600℃ 的零件	内燃机排气阀、紧固件
	3Cr18Mn12SiN				锅炉和汽轮机钢管
铁素体型耐热钢	0Cr13Al	主要含 Cr	抗氧化性好	900℃ 下的耐氧化零件	燃气透平机的叶片、淬火台架
	1Cr17				散热器、炉用部件
马氏体型耐热钢	4Cr9Si2	Cr 含量比较高	热强性、抗氧化性好	承受较大载荷的零件	内燃机进气阀、排气管
	1Cr13				汽轮机叶片
沉淀硬化型耐热钢	0Cr17Ni4Cu4Nb、 07Cr17Ni7Al	主要含 Cr、Ni	成形性和焊接性好	承受超高强度的零件	旋转机械的叶片、发动机材料

在航空航天、发动机、热能工程、化工及军事工业部门,有许多机器零件是在高温下工作的,常常使用具有高耐热性的耐热钢。钢的耐热性包括高温抗氧化性和高温强度两方面,即高温下对氧化作用的抗力和高温下承受机械负荷的能力。因此,耐热钢既要求高温抗氧化性能好,又要求高温强度高。

### 1. 高温抗氧化性

金属的抗氧化性通常不是说其不氧化,而是在高温下表面迅速氧化形成一层致密的氧化膜,隔离了高温氧化环境与钢基体的直接作用,使钢不再被氧化。一般碳钢在高温下表面生成疏松多孔的氧化亚铁,易剥落且环境中氧原子能不断地通过氧化亚铁扩散至钢基体,使钢连续不断地被氧化。

### 2. 高温强度

高温强度又称热强性,是钢在高温下抵抗塑性变形和断裂的能力。为了提高钢的高温强度,通常采用固溶强化、沉淀析出相强化和晶界强化的方法,以阻碍原子扩散及位错的运动。耐热钢的晶粒粒径大小合适,并且还可通过加入钼、铁、钒、硼等晶界吸附元素,稳定晶界组织,提高强度。

## 习 题 6

- 6-1 合金元素在钢中有哪些作用?
- 6-2 合金元素对钢的基本相及其性能的影响主要有哪些?
- 6-3 低合金钢是如何分类的?常用的两种低合金钢与普通碳素钢相比具有哪些优点?
- 6-4 简述合金渗碳钢的成分特点、性能要求、典型牌号和用途。
- 6-5 简述合金调质钢的成分特点、典型牌号和用途。
- 6-6 简述合金弹簧钢的成分特点、性能要求、典型牌号和用途。
- 6-7 简述滚动轴承钢的成分特点、性能要求、典型牌号和用途。
- 6-8 简述合金模具钢的种类、成分特点、性能要求、典型牌号和用途。
- 6-9 简述不锈钢和耐热钢的种类、典型牌号和用途。