

第 2 章 钢铁材料及其在汽车上的应用

钢铁材料又称为黑色金属,是以铁为主要元素形成的铁碳合金。常用的黑色金属材料根据含碳量的不同分为钢(含碳量小于 2.11%的铁碳合金)和铸铁(含碳量大于 2.11%的铁碳合金)两大类。由于其价格低廉,便于冶炼,容易加工,而且性能又多种多样,能满足众多生产要求,因此,钢铁材料已经成为使用最广泛、用量最大的金属材料。

不同的金属材料因为具有不同的化学成分和组织结构而使得各自的性能也不同,即使同一成分的合金材料,加工处理方法不同,也会使其性能发生很大的变化。根本原因是由于材料内部结构不同。所以,研究金属材料的内部结构对于掌握材料的性能及合理选材是非常重要的。

生产中常利用金属材料的组织和性能之间有着密切关系这一特性,采取热处理、合金化等多种处理方法来改变材料的组织结构,控制材料的性能,以满足实际生产中的各种要求。

2.1 金属的晶体结构与结晶

金属材料在不同的使用场合下,所要求的力学性能、物理性能、化学性能以及工艺性能各不相同。虽然都是金属材料,但是不同成分和不同状态下的性能差异非常大。造成金属材料性能差异的主要原因是金属材料内部结构的不同。了解和掌握金属材料的内部特征,对于正确理解材料的性能差异和合理选材非常有益。

2.1.1 晶体及其特点

自然界中的固态物质,虽然外形各异,种类繁多,但都是由原子或分子堆积而成的。根据内部原子堆积的情况,固态物质通常可以分为晶体和非晶体两大类。晶体中的原子或分子,在三维空间中是按照一定的几何规律作周期性的重复排列;非晶体中的原子或分子则是杂乱无章地堆积在一起且无规律可循。这就是晶体和非晶体的根本区别。在汽车工业中所用到的绝大多数金属和合金固态下都属于晶体,如纯铝、纯铁、纯铜等,而玻璃、沥青、松香、石蜡等则为非晶体。

1. 晶体的特点

首先,晶体具有规则的外形,如天然金刚石、水晶、食盐等。但有些晶体的外形不一定规则,这与晶体的形成条件有关。所以,判断某固态物质是否是晶体不能简单地从外形来判断,而应该从内部原子或分子的排列情况来判定。其次,晶体具有固定的熔点,当加热到一定温度时便会熔化。各种晶体物质的熔点各不相同,如铁的熔点为 $1\ 538\ ^\circ\text{C}$,铜的熔点为 $1\ 084.5\ ^\circ\text{C}$,铝的熔点为 $660.4\ ^\circ\text{C}$ 等。另外,晶体具有各向异性,即同一种晶体物质在不同方

向上具有不同的性能。对于非晶体而言,它没有固定的熔点。

晶体与非晶体差异很大,即使组成元素相同,如果排列方式不同,它们的性能往往相差悬殊。如金刚石和石墨,虽然都是由碳原子组成的,可是由于两者的原子排列方式不同,所以金刚石很硬,而石墨却很软。

晶体和非晶体差别虽然很大,但在一定条件下也可以相互转化。如非晶体玻璃经高温长时间加热能转变为晶态玻璃(钢化玻璃);而晶态的金属从液态快速冷却,也可获得非晶态金属。与晶态金属相比,非晶态金属具有很高的强度和韧性等突出性能,近年来受到人们的关注。

2. 晶体的结构

晶体大致由晶格、晶胞组成。

1) 晶格

晶体中原子在三维空间中的排列方式称为晶体结构,如图 2-1(a)所示。为了清楚地表明原子在空间的排列规律,一般将原子看作一个点,再用一些假想线条,将晶体中各原子的中心连接起来,便形成了一个空间格子。这种抽象了的、用于描述原子在晶体中规则排列方式的空间几何图形称为结晶格子,简称晶格,如图 2-1(b)所示。晶格中各种不同方位的原子面称为晶面。

2) 晶胞

晶体中原子的排列具有周期性变化的特点,因此,只要在晶格中选取一个能够完全反映晶格特征的最小的几何单元进行分析,便能确定原子排列的规律。组成晶格的最基本几何单元称为晶胞,如图 2-1(c)所示。实际上整个晶格就是由许多大小、形状和位向相同的晶胞在空间重复堆积而成的。

为了满足研究晶体结构的需要,在结晶学中规定用晶格常数来表示晶胞的几何形状和大小。晶胞的各棱边长度为 a 、 b 、 c ,如图 2-1(c)所示,称为晶格常数。当晶格常数 $a=b=c$,棱边夹角 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 时,这种晶胞称为简单立方晶胞。具有简单立方晶胞的晶体称为简单立方晶体,它只能在非金属晶体中见到,在金属晶体中是见不到的。

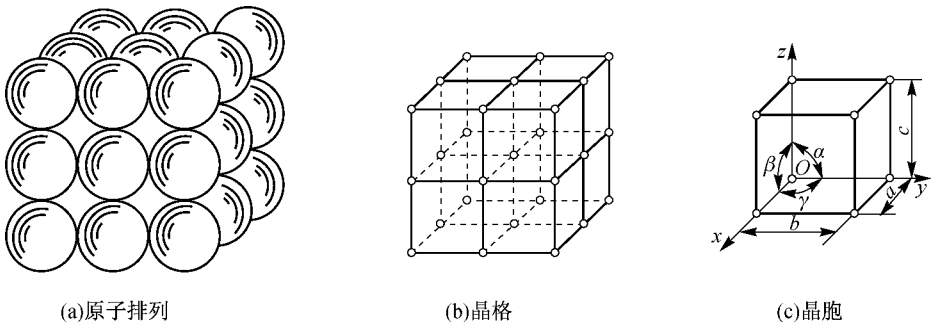


图 2-1 晶体的结构

各种晶体之间由于晶格类型和晶格常数的不同,便表现出不同的物理、化学和力学性能。

2.1.2 金属的晶体结构

在金属晶体中,由于金属键具有很强的结合力,所以金属中的原子趋向于紧密排列,使金

属的晶格类型大为减少,构成几种高度对称性的简单晶格形式。工业上常用的金属绝大多数具有比较简单的晶体结构,其中最典型的为面心立方晶格、体心立方晶格和密排六方晶格。

1. 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞如图 2-2(a)所示,该晶胞是一个立方体,在立方体的八个顶角及立方体各面的中心各有一个原子。面心立方晶格的晶胞的三个棱边长度 $a=b=c$,晶胞棱边夹角 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$,其晶格常数只用一个常数 a 表示。属于面心立方晶格类型的常见金属有铝(Al)、铜(Cu)、铅(Pb)、金(Au)及温度在 $912\sim 1\,394\text{ }^\circ\text{C}$ 之间的纯铁等,它们大多具有较高的塑性。

2. 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞如图 2-2(b)所示,该晶胞是一个立方体,在立方体的八个顶角及立方体的中心各有一个原子。体心立方晶格的晶胞的三个棱边长度 $a=b=c$,棱边夹角 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$,其晶格常数只用一个常数 a 表示。属于体心立方晶格类型的常见金属有铬(Cr)、钨(W)、钼(Mo)、钒(V)及 $912\text{ }^\circ\text{C}$ 以下的纯铁等,它们大多具有较高的强度和韧性。

3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞如图 2-2(c)所示,该晶胞是一个正六方柱体,在六方柱体的 12 个顶角及上下底面的中心各有一个原子,在柱体的内部还有三个原子。每个角上的原子同时为相邻的六个晶胞所共有,面中心的原子属于相邻两个晶胞所共有,而柱体中心的三个原子为该晶胞所独有。密排六方晶格的晶胞的三个棱边长度 $a=b\neq c$,晶胞棱边夹角 $\alpha=\beta=90^\circ$, $\gamma=120^\circ$,其晶格常数用正六边形底面的边长 a 和晶胞高度 c 表示。属于密排六方晶格类型的常见金属有镁(Mg)、锌(Zn)、铍(Be)、镉(Cd)、 α -钛(α -Ti)等,它们大多具有脆性大、塑性差的特点。

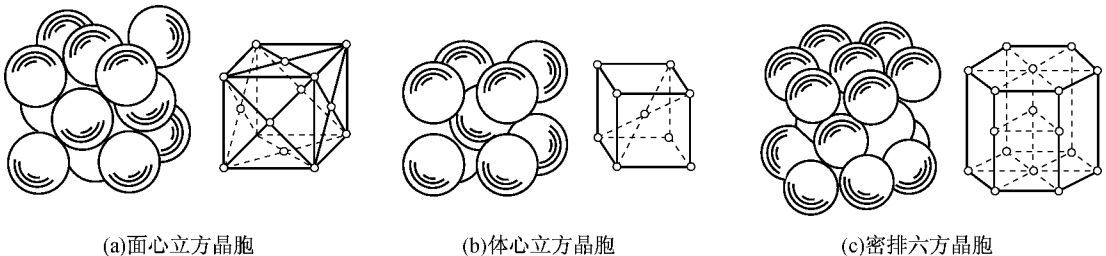


图 2-2 常见的金属晶胞

在上述三种典型金属晶格中,面心立方晶格和密排六方晶格中原子排列比体心立方晶格紧密。因此,当 γ -铁(面心立方晶格)转变为 α -铁(体心立方晶格)时,要发生体积膨胀,这是钢淬火时容易变形甚至开裂的原因之一。

2.1.3 金属实际的晶体结构

在理想情况下,晶体内部的晶格位向是完全一致的,即晶体的原子是按一定几何规律作周期性排列而成的,这种晶体称为单晶体,如图 2-3(a)所示。将实际使用的金属材料制成试样,用显微镜观察,可以看到它是由许多不同的小晶体组成,每个小晶体内部晶格位向基本上是一致的,而各小晶体之间位的向却不相同,如图 2-3(b)所示。这种外形不规则呈颗粒状的小晶体称为晶粒,每个晶粒相当于一个单晶体,其原子排列位向是一致的,而各个晶粒的晶格位向各不相同。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界,晶界上的原子处于过渡的不规则状

态,这些由许多晶粒组成的晶体称为多晶体。目前,只有采用特殊方法才能获得单晶体,而实际使用的晶体都是多晶体,并且都存在着各种晶体缺陷。

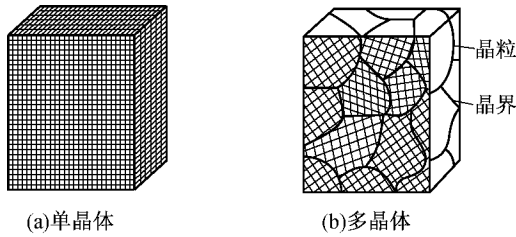


图 2-3 单晶体与多晶体示意图

在钢铁材料中,一般在显微镜下能观察到尺寸在 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ cm 的晶粒。有色金属如铜、锌、锡等的晶粒一般比钢铁的大一些,有些不用显微镜就能直接观察到。

在金属晶体中,由于晶体形成条件、原子的热运动及其他各种因素影响,使原子规则排列在局部区域受到破坏而呈现出不完整性,通常把这种区域称为晶体缺陷。晶体缺陷根据其几何特征,可分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三类。

1. 点缺陷

点缺陷是指长、宽、高尺寸都很小的缺陷。常见的点缺陷是晶格空位、置换原子和间隙原子,如图 2-4 所示。在实际晶体结构中,晶格的某些节点往往未被原子所占有,这种空着的位置称为空位;置换原子是指节点上的原子被异类原子所置换;与此同时,又有可能在个别晶格空隙处出现多余原子,这种不占有正常晶格位置而处在晶格空隙中的原子,称为间隙原子。在空位和间隙原子附近,由于原子间作用力的平衡被破坏,使其周围原子发生靠拢或撑开而发生晶格歪曲(亦称晶格畸变)。晶格畸变的出现,会使金属产生内应力,使晶体性能发生变化,如强度、硬度和电阻增加,体积发生变化。

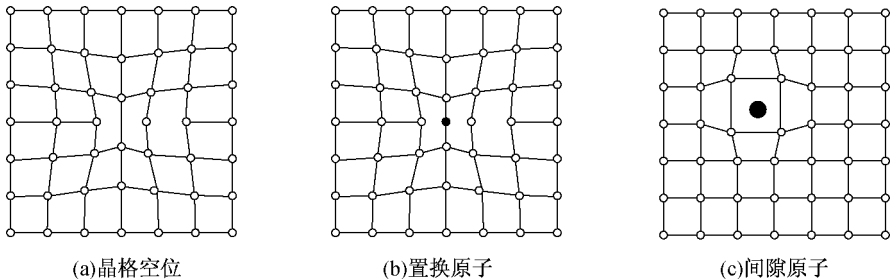


图 2-4 点缺陷

2. 线缺陷

线缺陷是指晶体内沿某一条线附近原子的排列偏离了完整晶格所形成的线形缺陷区,即发生了“位错”。位错可看作是晶格中一部分晶体相对于另一部分晶体的局部滑移而造成的结果,晶体滑移部分与未滑移部分的交界线即为位错线。由于晶体中局部滑移的方式不同,位错具有刃型和螺型两种不同类型,如图 2-5 所示。在图 2-5(a)的刃型位错中,ABCD 原子面好像一把刀插入晶体中,刀刃 CD 附近的原子排列不规则,晶体发生了畸变。在图 2-5(b)中,A 列和 D 列、B 列与 C 列原子上下没有对正,发生错排,晶格呈现畸变,这种位错线好像被一条螺旋线所包围,故称螺型位错。

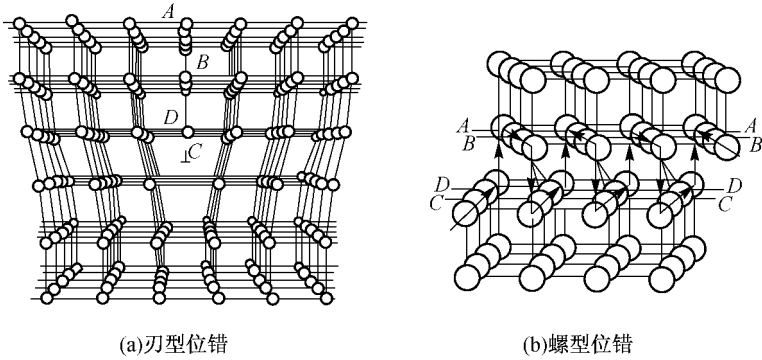


图 2-5 刃型位错和螺型位错

位错的存在对金属的力学性能影响很大。例如,金属材料处于退火状态时,位错密度较低,强度较差;经冷塑性变形后,材料的位错密度增加,故强度提高。位错在晶体中易于移动,金属材料的塑性变形可通过位错移动来实现。因此,位错理论是研究金属材料强度的理论依据。

3. 面缺陷

面缺陷是在两个方向的尺寸很大,第三个方向的尺寸很小而呈面状的缺陷,主要指晶界和亚晶界。

实际金属材料一般都是多晶体结构,多晶体有晶界。多晶体中两个相邻晶粒之间的位向不同,所以晶界处实际上是原子排列逐渐从一种位向过渡到另一种位向的过渡层,该过渡层的原子排列是不规则的。由于过渡层原子排列不规则,使晶格处于歪扭畸变状态,因而在常温下会对金属塑性变形起阻碍作用,从宏观上来看,晶界处表现出较高的强度和硬度。晶粒越细小,晶界越多,它对塑性变形的阻碍作用就越大,金属的强度、硬度也就越高。亚晶界实际上是由一系列刃型位错所组成的小角度晶界,由于亚晶界处原子排列也是不规则的,使晶格产生了畸变。因此,亚晶界作用与晶界相似,对金属强度也有着重要影响,亚晶界越多,强度也越高。

2.1.4 合金的晶体结构

纯金属具有优良的物理、化学性能,如具有良好的导电、导热性,有的金属熔点很高,耐腐蚀性好。但同时纯金属存在强度、硬度偏低,种类有限,制取困难,价格较高等缺点,在工业中使用很有限。工业上所使用的金属材料大多都是合金材料,如钢、普通黄铜、硬铝、铸铁等。

1. 基本概念

1) 合金

合金是指由两种或两种以上的金属或金属与非金属,经熔炼、烧结或其他方法结合成具有金属特性的物质。例如,应用最普遍的碳钢和铸铁就是由铁和碳组成的铁碳合金,黄铜是由铜和锌组成的合金。

2) 组元

组元简称元,是指组成合金最基本的独立物质。组元通常是纯元素(金属元素或非金属元素),也可以是稳定的化合物。例如,黄铜的组元是铜和锌,碳钢的组元是铁和碳,或者是铁和金属化合物 Fe_3C 。根据组成合金组元数目的多少,合金可分为二元合金、三元合金或多元合金等。

3) 合金系

合金系是指由两个或两个以上的组元按照不同比例配制而成的一系列不同成分的合金。例如,铜和镍组成的一系列不同成分的合金,统称为铜-镍合金系。

4) 相

相是指合金中具有同样的聚集状态、同样的结构和性质的均匀组成部分。例如,液态物质称为液相,固态物质称为固相,铁碳合金在固态下有铁素体、奥氏体和渗碳体等基本相。

5) 组织

组织是指用肉眼或借助显微镜观察到的材料具有独特微观形貌特征的部分。组织反映材料的相组成、相形态、大小和分布状况,它是决定材料最终性能的关键。习惯上将用放大几十倍的放大镜或用肉眼可观察到的组织称为低倍组织或宏观组织;将用放大 100~2 000 倍的光学显微镜方可观察到的组织称为显微组织;用放大几千倍到几十万倍的电子显微镜观察到的组织称为电镜组织或精细组织。

2. 固态合金的相结构

合金在熔点以上时各组元都能互相溶解,形成均匀液溶体。固态时由于各组分之间相互作用不同,可能出现两种基本相:固溶体和金属化合物。

1) 固溶体

固溶体是合金的一种组元溶解在另一种组元中而形成的均匀固相。固溶体的晶格类型与其中某一种组元的晶格类型相同,而其他组元的晶格结构将要消失。能保持原有晶格结构的组元称为溶剂,而晶格消失的组元称为溶质。一般情况下,溶质的含量比溶剂的含量低,它以原子的形态分布在溶剂晶格里。因此,固溶体的晶格与溶剂的晶格相同。根据溶质原子在溶剂中所占位置的不同,固溶体可分为置换固溶体和间隙固溶体两种类型。溶剂晶格中的某些节点位置被溶质原子取代的固溶体称为置换固溶体,如图 2-6(a)所示。溶质原子溶入溶剂晶格之中而形成的固溶体称为间隙固溶体,如图 2-6(b)所示。

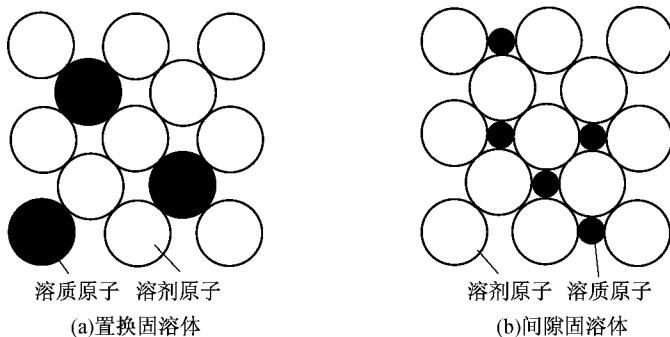


图 2-6 固溶体的晶体结构示意图

无论是置换固溶体还是间隙固溶体,溶质原子溶入后都会使点阵发生畸变,同时,晶体的晶格常数也会发生改变,溶质与溶剂的原子尺寸相差越大,畸变越大。畸变的存在使位错运动阻力增加,从而提高了合金的强度和硬度,而塑性下降,这种现象称为固溶强化。固溶强化是提高金属材料力学性能的重要途径之一。

2) 金属化合物

金属化合物是指由合金中各组元的原子按一定比例相互作用而生成的一种新的具有金属特性的物质。金属化合物一般可用化学分子式表示,如 Fe_3C 、 TiC 、 CuZn 等。碳钢中的

Fe_3C , 黄铜中的 CuZn , 铝合金中的 CuAl_2 等都是金属化合物。

金属化合物具有复杂的晶体结构, 它的晶格类型和性能完全不同于组成它的各组元的晶格类型, 而是具有自己独特的晶体结构。金属化合物很少单独使用, 它是各类合金钢、硬质合金及许多有色合金的重要组成部分。金属化合物一般有熔点高、硬度高、脆性大的性能特点, 当合金中存在金属化合物时, 将使合金的强度、硬度及耐磨性提高, 但会使塑性降低。因此, 金属化合物是组成结构材料和工具材料的重要组成相, 但不能单独通过增加金属化合物的数量来提高合金的性能。

2.1.5 金属的结晶

金属的组织与结晶过程关系密切, 结晶后形成的组织对金属的使用性能和工艺性能有直接影响。因此, 了解和研究金属结晶的基本规律, 对改善金属材料的组织和性能具有非常重要的意义。

1. 结晶

物质由液态冷却转变为固态的过程称为凝固。如果凝固的固态物质是原子(或分子)作有规则排列的晶体, 则这种凝固又称为结晶。从内部结构来看, 结晶就是原子从不规则(液态)的排列过渡到按照一定的几何形状(固态)作有序排列的过程。

金属从液态过渡到固体晶态的转变称为一次结晶, 而金属从一种固态过渡到另一种固态的转变称为二次结晶。

金属都有一个固定的熔点 T_m , 例如, 铁的熔点是 1538°C 。在熔点温度, 金属液体与晶体同时共存并处于平衡状态, 金属液体不能进行有效的结晶, 此熔点温度为理论结晶温度 T_0 。在实际生产中, 金属液体只有冷却至低于 T_0 的某一温度 T_n (实际结晶温度) 时才能有效地进行结晶, 这种现象称为过冷。理论结晶温度与实际结晶温度之差称为过冷度, 即 $\Delta T = T_0 - T_n$ 。实际上, 金属总是在过冷情况下进行结晶的, 所以过冷是金属结晶的一个必要条件。

金属在结晶时要放出结晶潜热, 因此, 可用热分析法来测定金属的结晶温度。热分析法是先将金属熔化, 然后冷却下来, 在冷却过程中每隔一定时间测一次温度, 最后将测得的数据绘在温度-时间坐标上, 即可得到冷却曲线, 如图 2-7 所示。图中冷却曲线的水平段表示液体金属在结晶时放出的结晶潜热补偿了它向外散失的热量, 故温度 T_n 不变, 该温度就是结晶温度。若冷却速度极其缓慢, 则 ΔT 趋于零, 实际结晶温度 T_n 就接近理论结晶温度 T_0 了。

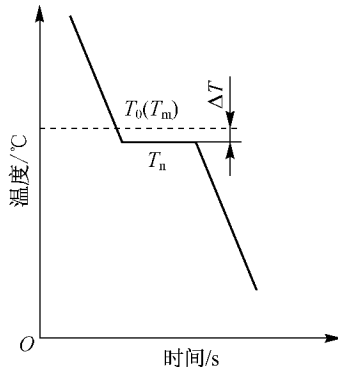


图 2-7 金属的冷却曲线

T_n —实际结晶温度; T_0 —理论结晶温度; ΔT —过冷度; T_m —熔点

2. 金属的结晶过程

在金属液体中,总是存在着一些类似晶体中原子排列规则的小集团。在熔点或熔点以上,这些小集团是不稳定的,时聚时散,此起彼伏。当低于熔点时,这些小集团中的一部分长大至一定尺寸后,就能成为比较稳定的小晶体。这些小晶体作为结晶中心,称为晶核。实际上,金属液体并不是很纯的,其中总有一些固态杂质存在,在结晶时,晶核大多依附在这些固态杂质表面上形成晶体。

晶核形成后,随着时间的推移而逐渐长大。开始时,晶体较小,因其内部的原子排列规则,故其外形也就比较规则;随后,由于晶体棱角处的散热条件优于其他部位而得到优先长大,形成枝干状,同时,在枝干长大过程中又会不断生出分支,这就像树枝一样先长主干后长分支,结果形成树枝状晶体,简称枝晶。最后,枝晶间隙处的金属液体凝固,形成一个晶粒。液体中新的晶核又会不断产生和长大,直到相邻的小晶体彼此相接触,液体完全消失,结晶过程也就完成了,如图 2-8 所示。因此,金属的结晶包括晶核的形成和晶核的长大两个基本过程,并且这两个过程是同时进行的。

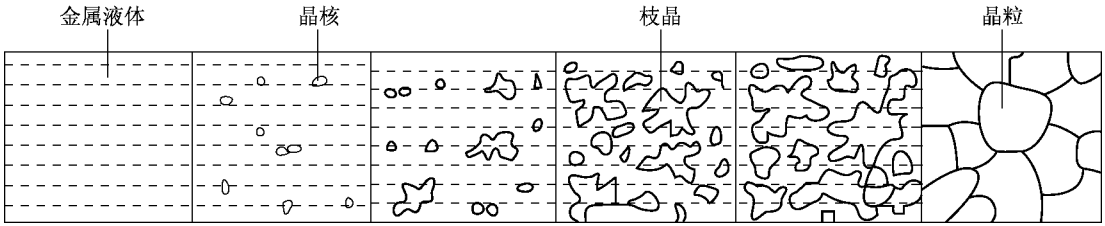


图 2-8 金属结晶过程示意图

结晶后的金属是由许多晶粒组成的多晶体,实验证明,在常温下晶粒越小,金属的强度、硬度越大,塑性、韧性越好。因此,工程上经常通过使金属材料的晶粒细化来提高金属的力学性能。常用的细化晶粒的方法包括增大过冷度、变质处理和机械振动等。

1) 增大过冷度

从金属的结晶过程可知,一定体积的液态金属中,形成的晶核数目越多,则结晶后的晶粒也越多,晶粒就越细小。随着过冷度的增大,晶核的数目增加,因此,增大过冷度可以增加单位体积内晶粒的数目,从而使晶粒细化。但过冷度过大或温度过低时,原子的扩散能力降低,形核的速率反而减小。实际生产中,增大过冷度的主要方法是提高液体金属的冷却速度以增加形核数目,如在铸造生产中,为了提高铸件的冷却速度,可以用导热系数大的金属铸型代替砂型。

2) 变质处理

当金属的体积比较大时,获得较大的过冷度比较困难,而且对于形状复杂的铸件,冷却速度也不能过快。生产中为了得到细晶粒的铸件,常采用变质处理。变质处理是在液体金属中加入能非自发形核的物质,这种物质称为变质剂。变质剂的作用在于增加晶核的数量或者阻碍晶核长大。例如,在铁水中加入硅铁、硅钙合金,能使组织中的石墨变细,脱氧也可起到细化晶粒的作用。

3) 机械振动

在金属结晶过程中采用机械振动、超声波振动等措施,也可以有效地细化晶粒。机械振动可以促进液态金属运动,造成枝晶破碎,使晶粒细化。同时,破碎晶体又可以起到晶核的作用,增大形核速率,也使晶粒细化。

2.2 铁碳合金

铁碳合金是以铁和碳为基本组元的合金,它是现代机械工业中应用最广泛的金属材料。要合理地选择铁碳合金,就必须熟悉铁碳合金的成分、组织和性能之间的关系。

2.2.1 铁碳合金的基本组织

将含有质量分数为 0.10%~0.20% 杂质的铁碳合金,称为工业纯铁。工业纯铁的塑性、导磁性良好,但强度较低,不适宜制作机械零件。为了提高工业纯铁的强度、硬度,常在工业纯铁中加入少量碳元素,由于铁和碳之间的交互作用,可形成铁素体、奥氏体、渗碳体、珠光体和莱氏体五种基本组织。

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”或“ α ”表示。由于 α -Fe 具有体心立方晶格,而且晶格间隙很小,因而溶碳能力极差。在室温时,铁素体的溶碳量几乎为零(仅为 0.0008%),随着温度的升高略有增加,在 727℃ 时,最大溶碳量为 0.0218%。

由于铁素体溶碳量小,力学性能与工业纯铁相似,所以其塑性和冲击韧性较好,而强度、硬度较低。在显微镜下观察,铁素体为均匀明亮的多边形晶粒,如图 2-9 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”或者“ γ ”表示。由于 γ -Fe 为面心立方晶格结构,且晶格间隙较大,所以溶碳能力比铁素体强,在 727℃ 时,溶碳量为 0.77%,在 1148℃ 时,溶碳量最大可达 2.11%。

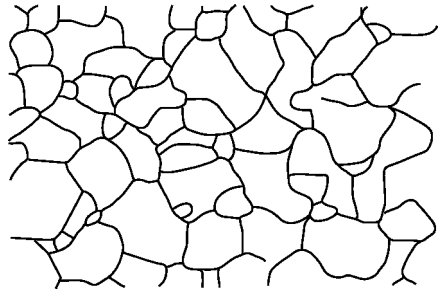


图 2-9 铁素体的显微结构

奥氏体的力学性能与其溶碳量和晶粒的大小有关。奥氏体的硬度不大(170~220 HBS),塑性很好(伸长率 δ 在 40%~50% 之间)。因此,奥氏体的强度、硬度较小,而塑性和韧性较强,易于锻压成型。它是绝大多数钢在高温进行压力加工时所需的理想组织,也是钢进行某些热处理加热时所需的组织,在轧制或锻造时常将钢加热至奥氏体状态。

3. 渗碳体

渗碳体(Fe_3C)是铁和碳所形成的金属化合物,分子式为 Fe_3C 。渗碳体中含碳量为 6.69%,熔点在 1227℃ 左右,渗碳体的硬度很大(950~1050 HV),而塑性和韧性几乎为零,故脆性很大,是一种硬而脆的组织。

渗碳体是碳钢中的主要强化相,在钢中与其他相共存时呈片状、球状、网状或板条状。渗碳体的形状、数量、分布等对钢的性能影响很大。渗碳体是一种亚稳定相,在一定条件下可分解,形成石墨状的自由碳和铁,即 $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}$ (石墨)。石墨的出现在铸铁材料中有着重要的意义。 Fe_3C 有磁性转变,在 230℃ 以下有弱铁磁性,而在 230℃ 以上会失去铁磁性。

4. 珠光体

珠光体是由铁素体和渗碳体组成的两相混合物,用符号“P”表示。珠光体中含碳量为 0.77%。由于珠光体是由硬的渗碳体片和软的铁素体片组成的混合物,故其力学性能介于渗碳体和铁素体之间。珠光体是钢中的重要组织。

5. 莱氏体

莱氏体分为高温莱氏体和低温莱氏体两种。奥氏体和渗碳体组成的混合物称为高温莱氏体,用符号“Ld”表示。由于其中的奥氏体属高温组织,因此,高温莱氏体仅存于 727 °C 以上。高温莱氏体冷却至 727 °C 以下时,将转变为珠光体和渗碳体的机械混合物,称为低温莱氏体,用符号“Ld'”表示。

莱氏体中的含碳量为 4.3%,其中含有的渗碳体较多,故其性能与渗碳体相近,即为硬而脆的组织。莱氏体是白口铸铁的基本组织。

以上介绍了铁碳合金的五种基本组织。在这五种基本组织中,铁素体、奥氏体、渗碳体都是单相组织,是基本相;而珠光体和莱氏体则是由基本相混合组成的两相组织。

2.2.2 铁碳合金相图

铁碳合金相图是研究钢和铸铁及其加工处理的主要理论基础,它反映了在平衡条件(极其缓慢冷却)下铁碳合金的成分、温度和组织之间的关系,显示了某些性能的变化规律。

由于溶碳量大于 6.69%的铁碳合金脆性极大,在工业生产中没有使用价值,所以我们只研究溶碳量小于 6.69%的部分。溶碳量等于 6.69%对应的正好全部是渗碳体,把它看作一个组元。实际上我们研究的铁碳相图是 Fe-Fe₃C 相图,如图 2-10 所示,其中包括共晶和共析两种典型反应。

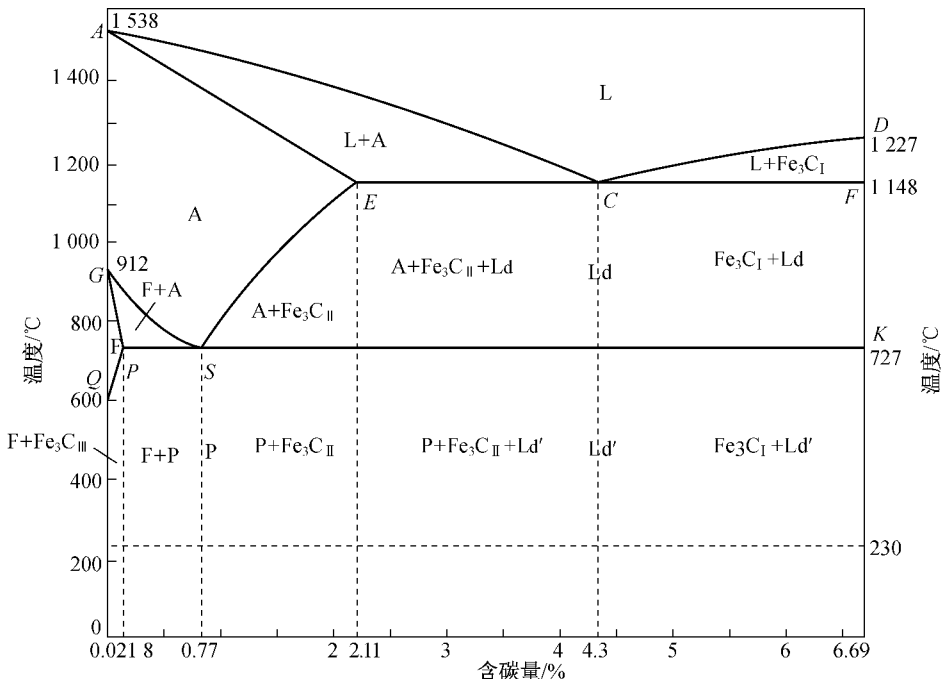


图 2-10 简化的 Fe-Fe₃C 相图

1. Fe-Fe₃C 相图中点、线的含义

1) Fe-Fe₃C 相图中特性点的含义

Fe-Fe₃C 相图中主要特性点的温度、含碳量及其说明见表 2-1。

表 2-1 Fe-Fe₃C 相图中的特性点(部分)

符 号	温 度/℃	含 碳 量/%	说 明
A	1 538	0	纯铁的熔点
C	1 148	4.3	共晶点及共晶合金的成分
D	约 1 227	6.69	渗碳体的熔点
E	1 148	2.11	碳在 γ -Fe 中的最大溶解度
F	1 148	6.69	共晶渗碳体的成分
G	912	0	α -Fe 与 γ -Fe 同素异构转变点
K	727	6.69	Fe ₃ C 的成分点
P	727	0.021 8	碳在 α -Fe 中的最大溶解度
S	727	0.77	共析点
Q	600	0.005 7	600 ℃时碳在 α -Fe 中的溶解度点

2) Fe-Fe₃C 相图中特性线的意义

简化的 Fe-Fe₃C 相图中各特性线的符号、名称、意义如下：

(1) ACD 线为液相线，在此线以上的合金为液态。液态合金冷却到该线时开始结晶，在 AC 线以下从液态合金中结晶出奥氏体(A)；在 CD 线以下从液态合金中结晶出的是一次渗碳体(表示为 Fe₃C_I)。

(2) AECF 线为固相线，在此线以下，合金液冷却到此线时全部液态结晶为固体合金。

(3) ECF 线为共晶线。含碳量在 2.11%~6.69%之间的铁碳合金液在此温度下均会发生共晶反应，形成奥氏体和渗碳体的机械混合物，即莱氏体。

(4) PSK 线为共析线，又称 A₁ 线。含碳量大于 0.021 8%的铁碳合金液在此温度下均发生共析转变，形成铁素体和渗碳体的机械混合物，即珠光体。

(5) GS 线又称 A₃ 线。它是含碳量小于 0.77%的铁碳合金液在冷却时由奥氏体析出铁素体的开始线，或加热时铁素体溶入奥氏体的终止线。

(6) ES 线为碳在奥氏体中的溶解度曲线，又称 A_{cm} 线。它表示随着温度的降低，奥氏体中含碳量沿着此线逐渐减少，多余的碳以渗碳体的形式析出。这种从奥氏体中析出的渗碳体称为二次渗碳体(Fe₃C_{II})。

(7) PQ 线是碳在铁素体中的溶解度曲线，它表示随着温度的降低，铁素体中含碳量沿着此线逐渐减少，多余的碳以渗碳体的形式析出。这种从铁素体中析出的渗碳体称为三次渗碳体(Fe₃C_{III})，由于其数量极少，在钢中一般影响不大，故可忽略不计。

以上所述的 Fe₃C_I、Fe₃C_{II}、Fe₃C_{III} 三种渗碳体中的含碳量、晶体结构和自身性能都相同，主要区别是形成条件不同，分布形态各异，对铁碳合金性能的影响也不同。

2. 铁碳合金分类

Fe-Fe₃C 相图中不同成分的铁碳合金,在室温下将得到不同的显微组织,其性能也不同。通常根据铁碳合金含碳量和室温组织的特点,以 Fe-Fe₃C 相图中的 P 点和 E 点为分界点,将铁碳合金分为工业纯铁、钢及白口铸铁三类。

1) 工业纯铁

工业纯铁是指 P 点以左的铁碳合金(含碳量小于 0.021 8%),室温组织为铁素体+少量三次渗碳体。工业纯铁的性能特点是塑性和韧性好,硬度和强度较低。

2) 钢

钢是指高温固态组织为单相固溶体的一类铁碳合金。相图中 P 点成分与 E 点成分之间的铁碳合金(含碳量在 0.021 8%~2.11%之间)具有良好的塑性,适于锻造、轧制等压力加工,根据室温组织的不同又分为亚共析钢、共析钢和过共析钢三种。亚共析钢是 P 点成分与 S 点成分之间的铁碳合金(含碳量在 0.021 8%~0.77%之间),室温组织为铁素体+珠光体,随含碳量的增加,组织中珠光体的量增大。共析钢是 S 点成分(含碳量为 0.77%)的铁碳合金,室温组织全部是珠光体的铁碳合金。过共析钢是 S 点成分与 E 点成分之间的铁碳合金(含碳量在 0.77%~2.11%之间)。室温组织为珠光体+渗碳体,渗碳体分布于珠光体晶粒的周围,在金相显微镜下观察呈网状结构,因此又称为网状渗碳体。钢的含碳量越高,渗碳体层越厚。

3) 白口铸铁

白口铸铁是指 E 点成分以右的铁碳合金(含碳量在 2.11%~6.69%之间)。白口铸铁有较低的熔点,流动性好,便于铸造,脆性大。根据室温组织的不同,白口铸铁又分为亚共晶白口铸铁、共晶白口铸铁和过共晶白口铸铁三类。亚共晶白口铸铁是 E 点成分与 C 点成分之间的铁碳合金(含碳量在 2.11%~4.3%之间),其室温组织为低温莱氏体+珠光体+二次渗碳体。共晶白口铸铁是 C 点成分的铁碳合金(含碳量为 4.3%),其室温组织为低温莱氏体。过共晶白口铸铁是 C 点成分以右的铁碳合金(含碳量在 4.3%~6.69%之间),室温组织为低温莱氏体+一次渗碳体。

2.2.3 铁碳合金相图的应用

1. 在材料选择方面的应用

依据铁碳合金成分、组织、性能之间的变化规律,可以根据零件的工作条件来选择材料。

如果机件要求具有良好的焊接性能和冲压性能,应该选用组织中铁素体较多、塑性好的低碳钢($w_c < 0.25\%$)制造,如冲压件、桥梁、船舶和各种建筑结构钢件。

如果机件要求具有较高的综合力学性能(强度、硬度、塑性和韧性等都要求较高)。如齿轮、传动轴等应选用中碳钢($0.25\% < w_c < 0.6\%$)来制造。

对于要求高硬度、高耐磨性的工具、磨具、量具等机械构件以及一些弹性零件,应该选用高碳钢($w_c > 0.6\%$)来制造。

对于形状复杂的箱体、机座等可选用铸造性能好的铸铁来制造。

2. 在铸造生产中的应用

在铸造生产中,根据 Fe-Fe₃C 相图可以确定铸钢和铸铁的浇铸温度。浇铸温度一般在液相以上 50~100 °C。另外,从相图中还可看出,接近共晶成分的铁碳合金熔点低、结晶温

度范围窄,因此,它们的流动性好,体积收缩性小,可以得到组织致密的铸件。所以在铸铁生产中总是将含碳量选在共晶成分范围。在铸钢生产中,普遍将含碳量限定在 $0.15\% \sim 0.6\%$ 之间,因为该处钢的结晶温度变化较小,铸造性能较好。

3. 在锻造和热轧生产中的应用

当钢处于单相奥氏体时,塑性好而且变形抗力小,便于成型。因此,钢材在锻造和热轧时要将钢加热到单相奥氏体区。为了避免钢材氧化严重和发生奥氏体晶界熔化(称为过烧现象),始轧和始锻温度不能过高,一般控制在固相线以下 $100 \sim 200\text{ }^\circ\text{C}$ 。为了使奥氏体晶粒细化,终轧和终锻温度也不能过高,同时又不能过低,以免塑性降低,导致裂纹产生。一般对于亚共析钢的终轧和终锻温度控制在稍高于GS线即 A_3 线内;过共析钢控制在稍高于PSK线即 A_1 线内。实际生产中各种碳钢的始轧和始锻温度控制在 $1150 \sim 1250\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,而终轧和终锻温度控制在 $750 \sim 850\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内。

4. 在焊接方面的应用

在焊接过程中,由于焊缝和母材处于不同温度条件下,因而在整个焊缝区会出现不同组织,引起焊缝周围材料性能不均匀和产生焊接应力。可以根据Fe-Fe₃C相图来分析碳钢的焊接组织,并用适当的热处理方法来减轻或消除组织不均匀性和焊接应力。

5. 在热处理工艺中的应用

Fe-Fe₃C相图对材料的热处理工艺尤为重要。不同的热处理工艺如退火、正火、淬火的加热温度确定时都以Fe-Fe₃C相图上的 A_1 、 A_3 和 A_{cm} 线为依据,这将在后续章节中详细阐述。

在运用Fe-Fe₃C相图时应注意以下问题:

(1)Fe-Fe₃C相图只反映铁碳二元合金中相的平衡状态,如果含有其他元素,相图也将发生变化。

(2)Fe-Fe₃C相图反映的是平衡条件下铁碳合金中的状态,若冷却或加热速度较快,其组织转变就不能只用相图来分析了。

2.3 碳 素 钢

碳素钢简称碳钢,在现代工业生产所使用的钢铁材料中占据十分重要的地位。由于具有冶炼、加工容易,价格低廉,工艺性能和力学性能良好等优点,因而碳钢是工农业生产中用量最大的金属材料。在汽车工业中,碳钢的用量占汽车用材总量的70%左右。

2.3.1 碳素钢的组成元素

常用的碳素钢,含碳量小于1.3%。实际上,碳素钢除含有Fe和C两种元素外,同时含有少量的硫、磷、硅、锰等杂质元素。这些杂质通常是由炼钢原材料带入或者由于冶炼工艺需要而有意加入的一些物质,它们的存在对钢铁的性能影响较大,尤其是硫、磷的含量应该严格控制在要求的范围内。

1. 硅

硅(Si)在碳素钢中属于有益元素。在炼铁、炼钢的过程中,由于原料中含有硅以及使用硅铁作为脱氧剂,使得钢中常含有少量的硅元素。硅在碳钢中的含量通常小于0.5%,它能溶入铁素体中并使之强化,提高钢的强度和硬度,同时降低塑性和韧性。

2. 锰

锰(Mn)在钢中也属于有益元素,它也是由于原材料中含有锰和使用锰铁脱氧而带入钢中的。锰在钢中的含量一般约为0.25%~0.8%。与硅相似,锰具有较强的脱氧能力,能够把钢水中的FeO还原为铁锰;同时,锰还可以与硫形成硫化锰,消除硫的有害作用。剩余的锰大部分溶解在铁素体中,并使其强化,少部分则溶于 Fe_3C 中,形成合金固溶体和合金渗碳体,提高了钢的强度和硬度。在机械加工中,锰能起到断屑作用,可以改善钢的切削性能。

3. 硫

硫(S)在钢中属于有害元素。硫也是从原料或在冶炼时带入钢中的,它在固态下不溶于铁,以FeS(熔点1190℃)的形式存在。FeS与Fe形成的低熔点(985℃)共晶体通常分布在晶界上。当将钢加热到1000~1200℃后进行压力加工时,分布在晶界上的低熔点共晶体产生过热或熔化,使钢沿晶界开裂,这种现象称为“热脆”。为了避免钢在进行压力加工时产生开裂,在钢中必须严格控制硫的含量。

4. 磷

磷(P)在钢中也属于有害元素。磷在常温固态下能全部溶入铁素体中,使钢的强度、硬度提高,而使塑性、韧性急剧降低,使钢材变脆。这种脆化现象在低温时表现得尤为突出,故称为“冷脆”。此外,磷的存在还会使钢的焊接性能变坏,因此,钢中含磷量也必须严格控制。

5. 其他元素

钢在冶炼时还会吸入和溶解一部分含氮(N)、氢(H)、氧(O)等元素的气体,从而影响钢的性能。尤其是氢可以使钢产生氢脆,也可以使钢中产生微裂纹(即白点)。

2.3.2 碳素钢的分类

几种常用碳钢的分类方法有:

按照碳钢中的含碳量,可以分为低碳钢(含碳量 w_C 低于0.25%)、中碳钢(含碳量 w_C 为0.25%~0.60%)和高碳钢(含碳量 w_C 高于0.60%)。

按照钢的用途,可以分为碳素结构钢(主要用于制造桥梁、船舶、建筑物等各类工程构件及齿轮、螺钉、螺母、连杆等各种机械零件,一般属于低碳钢和中碳钢)和碳素工具钢(主要用于制造各种刀具、量具和模具等,一般属于高碳钢)。

按照钢中有害杂质硫、磷的含量,可以分为普通碳素钢(硫的含量 w_S 低于0.055%,磷的含量 w_P 低于0.045%)、优质碳素钢(硫的含量 w_S 低于0.04%,磷的含量 w_P 低于0.04%)和高级优质碳素钢(硫的含量 w_S 低于0.03%,磷的含量 w_P 低于0.035%)三类。

2.3.3 碳素钢的牌号、性能及用途

碳素结构钢的含碳量一般小于0.77%,根据质量可分为普通碳素结构钢和优质碳素结构钢。

1. 普通碳素结构钢

普通碳素结构钢的牌号由代表屈服点的拼音字母“Q”、屈服点数值(单位为 MPa)和规定的质量等级符号、脱氧方法符号等组成。屈服点数值以钢材厚度(或直径)不大于 16 mm 的钢的屈服点数值表示。质量等级用 A、B、C、D 表示,它反映了普通碳素结构钢中有害元素硫、磷含量的多少。从 A 级到 D 级,钢中磷、硫含量依次减少,C、D 级的碳素结构钢由于磷、硫含量低、质量好,可做重要焊接结构件。脱氧方法用 F(沸腾钢)、b(半镇静钢)、Z(镇静钢)、TZ(特殊镇静钢)表示,牌号中的“Z”和“TZ”可以省略。例如,Q235AF 表示屈服强度为 235 MPa,质量为 A 级的沸腾碳素结构钢。

普通碳素结构钢具有较高的强度,良好的塑性和韧性,优良的工艺性能(焊接性、冷变形成型性),通常以型材(圆钢、方钢、工字钢、钢筋等)、板材、管材等形式用作桥梁建筑等工程构件及机械零件。在汽车零部件中,可用碳素结构钢制造的有螺钉、螺母、法兰轴、制动器底板、车厢板件、发电机支架、拉杆、销、键等。

2. 优质碳素结构钢

优质碳素结构钢牌号由两位阿拉伯数字或阿拉伯数字与特性符号组成。以两位阿拉伯数字表示平均含碳量(以万分之几计),如 08 表示钢中含碳量为 0.08%。锰含量较高的优质碳素结构钢,在表示平均含碳量的数字后面加锰元素符号。如 $w_C = 0.50\%$, $w_{Mn} = 0.70\% \sim 1.00\%$ 的钢,其牌号表示为“50 Mn”。高级优质碳素结构钢,在牌号后加符号“A”。沸腾钢、半镇静钢以及专门用途的优质碳素结构钢,应在两位数字后特别标出“F”,如含碳量为 0.10% 的沸腾钢表示为“10F”。

优质碳素结构钢中有害杂质及非金属夹杂物含量较少,化学成分控制得较严格,塑性和韧性较高,主要用来制造各种机械零件,一般需经热处理后使用,以充分发挥其性能潜力。常用优质碳素结构钢的牌号、用途见表 2-2。

表 2-2 优质碳素结构钢的用途

牌 号	用途举例
10 10F	用来制造锅炉管、油桶顶盖、钢带、钢板和型材,用于制造机械零件
20 15F	用于不承受很大应力而要求韧性好的各种机械零件,如拉杆、轴套、螺钉、起重钩等;也用于制造在 6.0×10^6 Pa(约 60 个大气压)、450 °C 以下非腐蚀介质中使用的管子等;还可以用于心部强度不大的渗碳与碳氮共渗零件,如轴套、链条的滚子、轴以及不重要的齿轮、链轮等
35	用于热锻的机械零件,冷拉和冷顶锻钢材,无缝钢管,机械制造中的零件,如转轴、曲轴、轴销、拉杆、连杆、横梁、星轮、套筒、轮圈、钩环、垫圈、螺钉、螺母等;还可用来铸造汽轮、轧钢机机身、飞轮等
40	用来制造机器的运动零件,如滚子、轴、曲柄销、传动轴、活塞杆、连杆、圆盘等
45	用来制造蒸汽涡轮机、压缩机、泵的运动零件;还可以用来代替渗碳钢制造齿轮、轴、活塞销等零件,但零件需经高频或火焰表面淬火,并可用作铸件
55	用于制造齿轮、连杆、轮圈、轮缘、扁弹簧及轧辊等,也可用作铸件
65	用于制造气门弹簧、弹簧圈、轴、轧辊、各种垫圈、凸轮及钢丝绳等
70	用于制造弹簧

3. 碳素工具钢

碳素工具钢中碳的平均含量为 0.65%~1.35%，以保证淬火后有足够高的硬度和耐磨性。

碳素工具钢的牌号一般由代表“碳”的拼音头字母“T”和数字组成，其中数字表示平均含碳量(以千分之几计)，例如，T11 表示含碳量 $w_c=1.1\%$ 的碳素工具钢。高级优质碳素工具钢在牌号后面标以字母“A”，如 T10A 表示平均含碳量为 1.0% 的高级优质碳素工具钢。锰含量较高时，在牌号后加“Mn”，如 T9MnA。未标明者为优质碳素钢。

碳素工具钢生产成本较低，加工性能良好，硬度和耐磨性高，可用于制造低速、手动刀具和常温下使用的工具、模具、量具等。一般市场上只供应退火状态的碳素工具钢，使用时需进行适当的热处理。几种常用碳素工具钢牌号、性能和用途见表 2-3。

表 2-3 几种常用碳素工具钢性能及用途

牌 号	主要性能	用 途
T7、T7A	承受冲击，韧性较好，硬度适当	扁铲、手钳、大锤、改锥、木工工具
T8、T8A	承受冲击，硬度较高	冲头、压缩空气工具、木工工具
T8Mn、T8MnA	承受冲击，硬度较高，淬透性较好	冲头、压缩空气工具、木工工具、断面较大的工具
T9、T9A、T10、T10A	韧性较好，硬度较高	冲头、木工工具、凿岩工具
T11、T11A	不能承受剧烈冲击，硬度高，耐磨性高	车刀、刨刀、冲头、丝锥、钻头、手锯条
T12、T12A	不能承受冲击，硬度高，耐磨性高	锉刀、刮刀、量具
T13、T13A	不能承受冲击，硬度高，耐磨性很高	刮刀、剃刀

4. 铸造碳素钢

铸造碳素钢简称铸钢，属于中、低碳钢，即亚共析钢。许多形状复杂的零件不便通过锻压等方法加工成型，用铸铁时性能又难以满足要求，此时可选用铸钢铸造。铸钢在机械制造尤其是重型机械制造业中应用非常广泛。

铸钢的牌号由“铸钢”两字的拼音头字母“ZG”和表示力学性能的两组数字组成，第一组数字代表最低屈服点，第二组数字代表最低抗拉强度值。例如，ZG200-400 表示屈服点为 200 MPa，抗拉强度为 400 MPa 的铸钢。几种常用铸钢的牌号、性能和用途见表 2-4。

表 2-4 几种常用铸钢的性能和用途

牌 号	主要性能	用 途
ZG200-400	良好的韧性、塑性和焊接性能	用于受力不大，韧性好的机械零件，如机座、变速器壳、减速器壳体等
ZG230-450	较高的强度和较好的塑性、韧性和焊接性能	用于受力不大，韧性好的机械零件，如砧座、外壳、轴承座、底板、箱体等
ZG270-500	较高的强度和较好的塑性，铸造性能好，焊接性能和切削性能好	用途广泛，用于轧钢机架、轴承座、连杆、箱体、曲轴、缸体、飞轮等

2.4 钢的热处理

钢的热处理是将钢在固态下进行加热、保温和冷却,以消除毛坯(铸件、锻件等)的缺陷,改善钢的加工工艺性能。

热处理工艺的种类繁多。根据加热和冷却方式的不同和组织性能的变化特点的不同,热处理可以分为普通热处理(退火、正火、淬火、回火等)、表面热处理(表面淬火和渗碳、渗氮、渗硼等化学热处理)及特殊热处理(形变热处理和磁场热处理)。根据在零件生产工艺流程中的位置和作用,热处理又可分为预备热处理和最终热处理两类。预备热处理(又称中间热处理)是零件加工过程中的一道工序,目的是为后续的机械加工或进一步的热处理做准备。工件经切削加工等成型工艺而得到最终的形状和尺寸后,再进行的赋予工件使用性能的热处理称为最终热处理。

热处理的工艺过程由加热、保温和冷却三个阶段组成,如图 2-11 所示为热处理最基本的工艺曲线。因此,要了解各种热处理方法对钢的组织 and 性能的影响,必须首先研究钢在加热、保温和冷却过程中的组织转变规律。

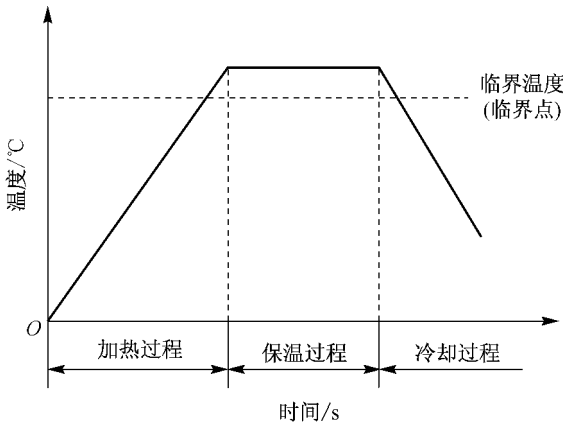


图 2-11 热处理工艺曲线

研究钢在加热和冷却时的相变规律是以铁碳合金相图为基础的,铁碳合金相图表示的是在极其缓慢的加热或冷却条件下(即平衡条件下)的组织转变。实际生产中的热处理,加热或冷却都是在一定速度下进行的,这种非平衡条件下的加热或冷却,使钢的相变温度(即临界点)与铁碳相图上的平衡临界点有一定偏差,即存在一定的过热度或过冷度。加热时的相变温度在平衡临界点以上,而冷却时的相变温度在平衡临界点以下。加热或冷却时的速度越大,过热度或过冷度越大,则相变温度偏离平衡临界点的程度就越大。

为了区别铁碳合金相图的平衡临界点 A_1 、 A_3 和 A_{cm} ,实际的临界点温度标为 Ac_1 、 Ac_3 、 Ac_{cm} ,在冷却时标为 Ar_1 、 Ar_3 、 Ar_{cm} ,如图 2-12 所示。这种非平衡条件下钢的组织转变也与铁碳合金相图有所不同。

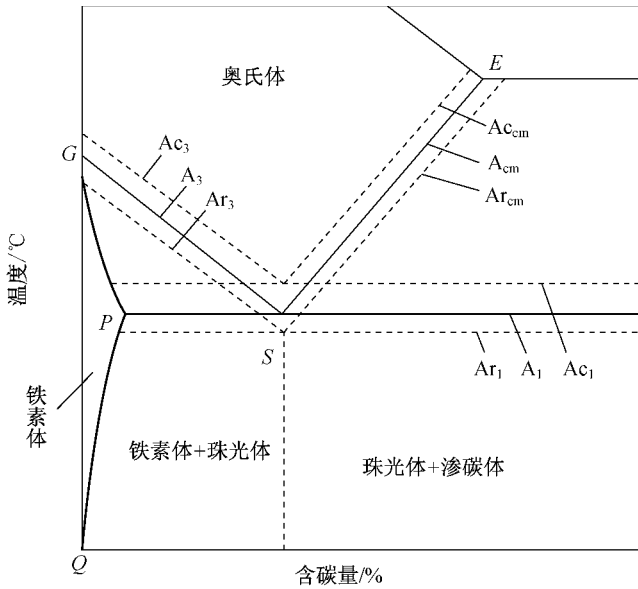


图 2-12 钢加热和冷却时各临界点的实际位置

2.4.1 钢在加热时的组织转变

加热是各种热处理必不可少的第一道工序。在多数情况下,加热的目的是使钢部分或完全处于奥氏体状态。通常将这种加热转变过程称为钢的奥氏体化,加热时奥氏体化的程度及晶粒大小对其冷却转变过程及最终的组织性能都有极大的影响。

以共析钢(含碳量 w_c 为 0.77%)为例,加热前其内部组织是珠光体,其中的铁素体和渗碳体间隔排列成片层状,加热时,奥氏体的转变过程可分为奥氏体的形核长大、奥氏体晶核长大、剩余渗碳体溶解和奥氏体成分的统一化四个阶段,如图 2-13 所示。

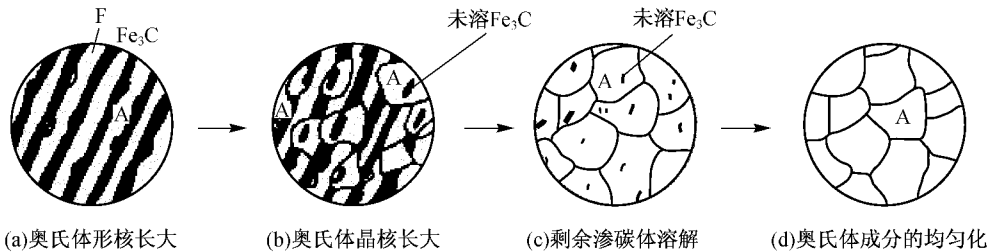


图 2-13 共析钢的奥氏体化过程示意图

奥氏体的晶核优先在铁素体与渗碳体的相界面处形成,如图 2-13(a)所示,这是由于在相界上成分不均匀,且晶格畸变较大,为产生奥氏体晶核提供了浓度和结构两方面的有利条件。奥氏体晶核形成后,晶核的一侧是铁素体,另一侧是渗碳体,如图 2-13(b)所示,从而使其与铁素体相接触处的含碳量降低,与渗碳体相接触处的含碳量增高,这就为铁素体转变为奥氏体和渗碳体的溶解提供了条件。通过原子扩散,奥氏体向铁素体和渗碳体两侧逐渐长大。在奥氏体晶核长大的过程中,由于铁素体向奥氏体的转变速度比渗碳体溶解速度快,因而在奥氏体全部形成之后,还残存一定量的未溶渗碳体,如图 2-13(c)所示。它们只能在随

后的保温过程中逐渐溶入奥氏体中,直至完全消失。渗碳体区域含碳量较高,铁素体区域含碳量较低,因此,必须继续保温,通过碳原子扩散获得含碳量均匀的奥氏体,如图 2-13(d)所示。

亚共析钢和过共析钢的奥氏体化过程与共析钢基本相同,不同的是亚共析钢或过共析钢在 $Ac_1 \sim Ac_3$ 或 $Ac_1 \sim Ac_{cm}$ 时会有一些未溶解的先共析铁素体或二次渗碳体存在。因此,亚共析钢和过共析钢加热到 Ac_1 点以上时,珠光体转变为奥氏体,得到的组织为奥氏体晶粒和先析出的铁素体或渗碳体。这种加热方式称为不完全奥氏体化。为了获得完全奥氏体组织,只有加热到 Ac_3 或 Ac_{cm} 点以上时,先析出相继续向奥氏体转变或溶解,才能获得单相的奥氏体组织,完全奥氏体化。

奥氏体晶粒的大小对随后冷却时的转变及转变产物性能有重要的影响。在珠光体刚转变为奥氏体时,大量的晶核造就了细小的奥氏体晶粒,但随着加热温度的升高和保温时间的延长,奥氏体晶粒就会自发地长大。奥氏体晶粒越粗大,冷却转变产物的组织越粗大,冷却后钢的力学性能就越差,特别是冲击韧度明显降低。所以,在淬火加热时,总希望得到细小的奥氏体晶粒,严格控制奥氏体晶粒度,就成为热处理生产中的一个重要问题。

影响奥氏体晶粒大小的因素包括加热温度、加热速度、冷却速度及其钢的成分等。在加热温度相同时,加热速度越快,保温时间越短,奥氏体晶粒就越小。因而常利用快速加热、短时保温来获得细小的奥氏体晶粒。此外,奥氏体的晶粒大小还与奥氏体中含碳量及合金元素的含量有关。奥氏体中含碳量增加,晶粒长大倾向增加。有的合金元素(如钛、钒、铝等)能在钢中形成稳定碳化物、氮化物、氧化物,从而能阻止奥氏体晶粒的长大,而磷、锰则有加速奥氏体晶粒长大的倾向。

2.4.2 钢在冷却时的组织转变

钢的最终力学性能主要取决于奥氏体冷却转变后的组织,冷却过程是热处理的关键工序,不同的冷却转变温度和冷却方式将决定钢最终的组织 and 性能。研究奥氏体在不同冷却条件下的组织转变规律具有非常重要的意义。

在热处理过程中,常用的冷却方式有等温冷却和连续冷却两种,如图 2-14 所示。等温冷却是将加热到奥氏体状态的钢快速冷却到临界温度以下的某一温度区间内并保温停留一段时间,使其在该温度下发生组织转变,然后再冷却到室温。连续冷却则是指将加热到奥氏体化状态的钢,以不同的冷却速度连续冷却至室温,并在连续冷却过程中发生组织转变。

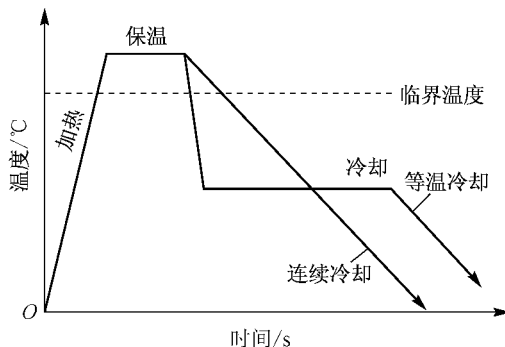


图 2-14 两种冷却方式示意图

为了研究奥氏体的冷却转变规律,通常采用两种方法:一种是在不同的过冷度下进行等温冷却,测定奥氏体的转变过程,绘出奥氏体等温转变曲线(即 TTT 曲线);另一种是在不同的冷却速度下进行连续冷却,测定奥氏体的转变过程,绘出奥氏体连续冷却转变曲线(即 CCT 曲线)。

1. 过冷奥氏体的等温转变

奥氏体等温转变(time temperature transformation)曲线又称 TTT 图,反映了奥氏体在冷却时的转变温度、时间和转变量之间的关系。将奥氏体化的共析钢快速冷却至临界点以下的某一温度等温停留,并测定奥氏体转变量与时间的关系,即可得到过冷奥氏体等温转变动力学曲线。它是在等温冷却条件下,通过实验的方法绘制的。

下面以金相法测定为例介绍共析钢过冷奥氏体等温转变曲线的建立过程。将共析钢试样分成若干组,每次取一组试样,在盐浴炉内加热使之奥氏体化后,置于一定温度的恒温盐浴槽中进行等温转变。停留不同时间之后,逐个取出并快速浸入盐水中,使等温过程中未分解的奥氏体转变为新相——马氏体。将各试样经制备后进行组织观察,马氏体在显微镜下呈白亮色。可见,白亮的马氏体数量就等于未转变的过冷奥氏体数量。当在显微镜下发现某一试样刚出现灰黑色产物(珠光体)时,所对应的等温时间即为过冷奥氏体转变开始时间,到某一试样中无白亮马氏体时,所对应的时间即为转变终了时间。用上述方法分别测定不同等温条件下奥氏体转变开始和终了时间,最后将所有转变开始和终了点标在温度—时间坐标上,并分别连接起来,即得到过冷奥氏体等温转变曲线。该曲线形状像字母“C”,故简称 C 曲线,如图 2-15 所示。

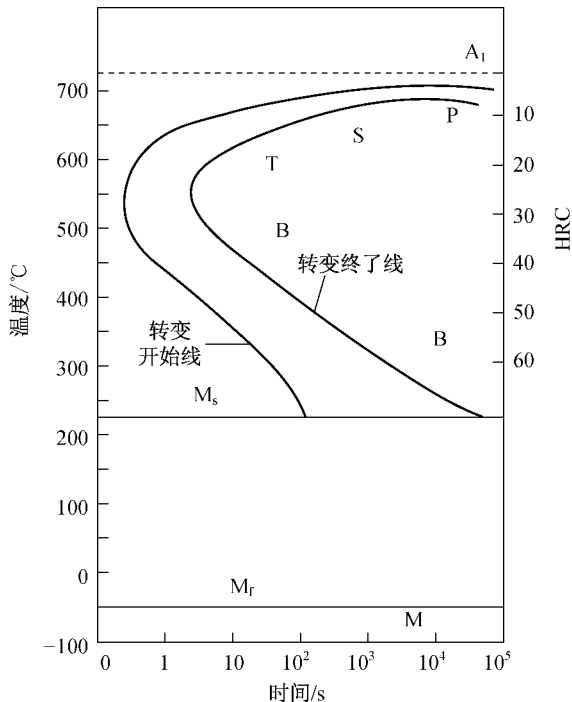


图 2-15 共析钢过冷奥氏体等温转变曲线

图 2-15 反映了奥氏体快速冷却到临界点以下在各种不同温度的保温过程中,温度、时间与转变组织、转变量的关系。C 曲线上部的水平线 A_1 ($727\text{ }^\circ\text{C}$) 是珠光体和奥氏体的平衡温度, A_1 线以上为奥氏体稳定区。C 曲线下部的两条水平线分别表示奥氏体向马氏体转变开始温度 M_s 和奥氏体向马氏体转变终温度 M_f , 两条水平线之间为马氏体和过冷奥氏体的共存区。图 2-15 中,左边的曲线反映了过冷奥氏体相应于一定温度开始转变为其他组织的时间,称为转变开始线;右边的曲线反映了过冷奥氏体相应于一定温度转变为其他组织的终了时间,称为转变终了线。一般以转变量的 1% 作为转变的开始点,而转变量的 99% 作为转变的终了点。在 A_1 和 M_s 之间及转变开始线以左的区域为过冷奥氏体区;转变终了线以右为转变产物珠光体或贝氏体区, M_f 以下为转变产物马氏体区;而转变开始线与转变终了线之间为转变过渡区,同时存在奥氏体和珠光体或奥氏体和贝氏体。

过冷奥氏体等温转变开始所经历的时间称为孕育期,它的长短标志着过冷奥氏体稳定性的大小。见图 2-15,共析钢在 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 左右孕育期最短,过冷奥氏体最不稳定,它是 C 曲线的“鼻尖”。在“鼻尖”以上区间,虽然温度较高,原子扩散能力较强,但由于过冷度太小(相变驱动力太小),使得新相形核长大较为困难,孕育期随温度升高而延长。在“鼻尖”以下区间,虽然过冷度较大,但由于此时温度已较低,原子扩散较困难,故孕育期也较长,且孕育期随温度降低而延长。

按温度的高低和组织形态,过冷奥氏体的等温转变可分为高温珠光体转变、中温贝氏体转变和低温马氏体转变三种。

1) 珠光体转变

珠光体转变属于高温转变。温度在 A_1 以下至 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 左右的温度范围内,过冷奥氏体转变成珠光体,即形成铁素体与渗碳体两相组成的相间排列的层片状的机械混合物组织,所以这种类型的转变又叫珠光体转变。在珠光体转变中,温度由 A_1 以下依次降到“鼻尖 ($550\text{ }^\circ\text{C}$)”左右,层片状组织的片间距离依次减小。根据层片的薄厚不同,这类组织又可细分为珠光体、索氏体和托氏体三种形式,它们之间的差别见表 2-5。

表 2-5 珠光体转变中的三种组织及比较

名称	代号	形成温度/ $^\circ\text{C}$	片层厚度	片间距	硬度	金相组织观察仪器
珠光体	P	$A_1 \sim 650$	较厚	较大	高	光学显微镜放大 500 倍
索氏体	S	$650 \sim 600$	较薄	较小	较高	光学显微镜放大 800~1 000 倍
托氏体	T	$600 \sim 550$	极薄	小	最高	电子显微镜

实际上,珠光体、索氏体和托氏体这三种组织的差别只是珠光体组织“片间距”的大小。形成温度越低,“片间距”越小,组织的硬度就越高。托氏体的硬度高于索氏体,也远高于珠光体。

奥氏体向珠光体的转变为扩散型的生核、长大过程,是通过碳、铁的扩散和晶体结构的重构来实现的。转变同时包括两个物理过程:一是碳原子和铁原子迁移产生高碳的渗碳体和低碳的铁素体;二是晶格重组,由面心立方的奥氏体转变为体心立方的铁素体和复杂斜方的渗碳体。

2) 贝氏体转变

贝氏体转变属于中温转变。过冷奥氏体在 $M_s \sim 550^\circ\text{C}$ 的转变称为中温转变,其转变产物为贝氏体,故称为贝氏体转变。贝氏体也是由铁素体与渗碳体组成的机械混合物,用符号 B 表示。但其形状和渗碳体的分布与珠光体不同,硬度也比珠光体的高。根据贝氏体的组织形态和形成温度区间的不同,可将其划分为上贝氏体与下贝氏体。

当温度在 $350 \sim 550^\circ\text{C}$ 之间时,条状或片状铁素体从奥氏体晶界开始以相同方向向晶体内平行生长。随着铁素体的伸长和变宽,其中的碳原子向条间的奥氏体中聚集,最后在铁素体条之间析出渗碳体,奥氏体消失,形成上贝氏体,用符号 B_s 表示。上贝氏体的形成温度较高,其中的铁素体条粗大,塑变抗力低。上贝氏体中的渗碳体分布在铁素体条之间,易于引起脆断,其强度和韧性均较低。

当温度在 $M_s \sim 350^\circ\text{C}$ 之间时,碳原子扩散能力低,铁素体在奥氏体的晶界或晶内的某些晶面上长成针状。尽管最初形成的铁素体固溶碳原子较多,但碳原子不能长距离迁移,因而不能超出铁素体片的范围,只能在铁素体内一定的晶面上以断续碳化物小片的形式析出,从而形成下贝氏体,用符号 B_x 表示。下贝氏体中铁素体细小、分布均匀,在铁素体内又析出细小弥散的碳化物,加之铁素体内含有过饱和的碳以及高密度的位错,因此,下贝氏体不但强度高,而且韧性也好,具有较优良的综合力学性能,是生产上常用的组织。

3) 马氏体转变

马氏体是碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的过饱和固溶体,用符号 M 表示。马氏体转变属于低温转变,这个转变持续至马氏体形成终了温度 M_f ,在 M_f 以下过冷奥氏体停止转变。当奥氏体获得极大过冷度,冷却至 M_s 以下(对于共析钢为 230°C 以下)时,将转变成马氏体类型组织。

马氏体转变中的组织形态与含碳量密切相关。含碳量在 0.25% 以下时,基本上是板条马氏体(也称低碳马氏体或位错马氏体)。当含碳量大于 1.0% 时,则大多数是片状马氏体(也称高碳马氏体或孪晶马氏体)。含碳量在 0.25%~1.0% 之间时,为板条马氏体和片状马氏体的混合组织。

马氏体的力学性能主要取决于含碳量、组织形态和内部结构。含碳量越高,马氏体硬度就越高,晶格的正方畸变大,淬火内应力也较大,通常存在许多显微裂纹。因此,板条马氏体具有优良的强韧性,而片状马氏体的硬度高,但塑性、韧性很差。

2. 过冷奥氏体的连续冷却转变

在实际生产中,过冷奥氏体大多数是在连续冷却过程中转变的。由过冷奥氏体等温转变曲线推测连续冷却条件下过冷奥氏体的转变是不准确的,因而必须建立过冷奥氏体连续冷却转变(continuous cooling transformation)曲线,又称 CCT 曲线。

如图 2-16 所示是共析钢的 CCT 曲线。图中阴影区的两条曲线分别为珠光体转变开始(P_s)与终了(P_f)曲线,AB 线为珠光体转变中上线(即珠光体转变中途停止,剩余的奥氏体不能转变为珠光体)。图 2-16 中没有贝氏体转变区,这是由于共析钢在连续冷却时,贝氏体转变被抑制所致。当冷却速度大于 v_c 时,过冷奥氏体将转变为马氏体;冷却速度小于 v_c' 时,则只发生珠光体转变;冷却速度介于 v_c 和 v_c' 之间时,一部分奥氏体转变成珠光体。图 2-6 中, v_c 称为马氏体临界冷却速度或临界淬火冷却速度,它反映了钢在淬火时得到马氏体的难易程度, v_c 越小,则淬火时用较小的冷却速度就可以得到马氏体。 v_c' 是使奥氏体全部转变为珠光体的最大冷却速度。

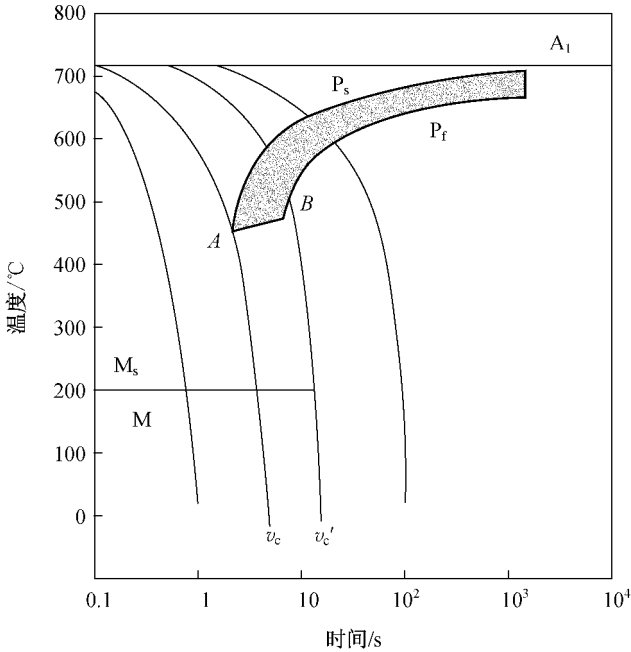


图 2-16 共析钢过冷奥氏体连续冷却转变曲线

由于连续冷却曲线的测定很困难,故生产中常用等温 C 曲线定性、近似地分析连续冷却转变。

2.4.3 钢的普通热处理

1. 钢的退火和正火

退火和正火是生产中应用很广泛的预备热处理工艺,通常安排在铸造、锻造之后,切削加工之前进行,其目的是消除前一工序所造成的某些组织缺陷和内应力,为随后的工序做准备。例如,经铸造、锻造等热加工以后,工件中往往存在残余应力,硬度偏高或偏低,组织粗大,存在成分偏析等缺陷。这样的工件力学性能低劣,不利于切削加工成型,淬火时也容易造成变形和开裂。经过适当的退火或正火处理可使工件的内应力消除,调整硬度以改善切削加工等力学性能,并为随后的淬火做准备。另外,对于一些受力不大,性能要求不高的机械零件,也可用作最终热处理。

1) 钢的退火

退火是把钢加热到适当的温度,经过一定时间的保温,然后缓慢冷却(一般为随炉冷却),以获得接近平衡组织的热处理工艺,其主要目的是减少钢锭、铸件、锻坯等的化学成分及组织的不均匀性,细化晶粒,降低硬度,消除内应力以及为淬火做好组织准备。

退火的种类很多,根据加热温度可分为两大类:一类是在临界温度(A_{c1} 或 A_{c3})以上的退火,又称为相变重结晶退火,包括完全退火、等温退火、球化退火和扩散退火等;另一类是在临界温度以下的退火,包括再结晶退火及去应力退火等。几种不同的退火工艺及其特点见表 2-6。

表 2-6 几种不同的退火工艺及其特点

类 型	目 的	工 艺 特 点	其 他
完全退火 (重结晶退火)	使中碳以上的亚共析碳钢和合金钢得到接近平衡状态的组织,以降低硬度,改善切削加工性能,还可消除内应力	加热至 A_{c3} 以上 $30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	
等温退火	与完全退火相同,但转变较易控制,能获得均匀的预期组织,对于奥氏体较稳定的合金钢,常可大大缩短退火时间	将亚共析钢加热到 A_{c3} (过共析钢加热至 A_{c1}) 以上 $30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温后快速冷却到 A_{c1} 以下某一温度并等温保持,然后出炉空冷	一般作为冷变形加工中间工序
球化退火	过共析钢、合金工具钢淬火前的预备热处理,使片状 Fe_3C 球化,以降低硬度,改善切削性能	加热到 A_{c1} 以上 $20\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$,较长时间保温后随炉冷却	当有网状 Fe_3C 存在时,必须先用正火消除 Fe_3C 网,再球化退火
扩散退火 (均匀化退火)	减少钢锭、铸件或锻坯的成分偏析和组织的不均匀性	加热至钢的熔点以下 $100\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$,长时间保温后随炉冷却	扩散退火后钢的晶粒很大,一般要进行完全退火或正火处理
去应力退火	消除铸件、锻件、焊接件、热轧件、冷加工件的內应力,以防止工件在以后加工或使用过程中的变形或开裂	加热到 A_{c1} 以下某一温度(碳钢为 $500\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$),保温后随炉冷却	可以消除內应力约 $50\%\sim 80\%$

2) 钢的正火

钢材或钢件加热到 A_{c3} (对于亚共析钢)或 A_{cm} (对于过共析钢)以上 $30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温适当时间后,使之完全奥氏体化,然后在空气中均匀冷却,以得到珠光体组织的热处理工艺称为正火。正火后组织以索氏体为主。

正火工艺是比较简单经济的热处理方法,在生产中应用较广泛,主要用于消除网状二次渗碳体,保证球化退火质量;消除中碳钢热加工出现的缺陷,细化晶粒,使组织均匀;消除内应力,用正火代替调质处理作为最终热处理可获得一定的综合机械性能;用正火来代替完全退火对低碳钢和低碳合金钢作为预备热处理。

3) 退火与正火的选用

退火与正火属于同一类型热处理方式。在实际生产中,退火与正火的选择主要从以下几个方面考虑:

(1)改善切削加工性。在一般生产中,低碳钢由于退火后硬度太低,切削加工时产生粘刀现象,切削性能差,通过正火可提高硬度,改善切削性能;中碳钢既可采用退火,也可采用正火;含碳量为 $0.45\%\sim 0.6\%$ 的高碳钢则必须采用完全退火;过共析钢用正火消除网状渗碳体后再进行球化退火。

(2)使用性能方面。如果对钢件的性能要求不太高,可采用正火作为最终热处理。但如果零件尺寸较大或形状较复杂,正火有可能使零件产生较大的残余应力或变形、开裂,应选择退火。对力学性能要求较高,必须进行淬火加回火的最终热处理零件,从减少变形和开裂的倾向性来说,预备热处理应选用退火。

(3)经济性方面。正火比退火生产周期短,操作简便。故在可能条件下,特别是在大批量生产时应优先考虑以正火代替退火。

2.4.4 钢的淬火

淬火是指将钢加热到 A_{c3} (亚共析钢) 或 A_{c1} (共析钢与过共析钢) 以上的某一温度, 保温后以大于临界冷却速度 v_c 进行快速冷却, 使奥氏体转变为马氏体 (或下贝氏体) 的热处理工艺。淬火的目的是获得马氏体 (或下贝氏体), 以提高钢的力学性能, 其实质是奥氏体化后进行马氏体转变 (或下贝氏体转变)。

1. 淬火温度确定

淬火温度即钢的奥氏体化温度, 是淬火的主要工艺参数之一。如果温度过高, 会因为奥氏体晶粒粗大而得到粗大的马氏体组织, 使钢的力学性能恶化, 特别是使塑性和韧性降低, 还会导致淬火钢的严重变形。如果淬火温度过低, 淬火组织中会保留未溶铁素体, 造成淬火硬度不足。淬火温度的确定应以获得均匀细小的奥氏体组织为原则, 以使淬火后获得细小的马氏体组织。

淬火温度一般限制在临界点以上 $30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内。亚共析钢的淬火温度一般为 A_{c3} 以上 $30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 淬火后获得均匀细小的马氏体组织。对于共析钢和过共析钢, 淬火加热温度一般为 A_{c1} 以上 $30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对于合金钢, 一般为临界温度以上 $50\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2. 保温时间的确定

为了使工件各部分均完成组织转变, 需要在淬火加热温度保温一定的时间, 通常将工件升温 and 保温所需的时间计算在一起, 统称为加热时间。影响加热时间的因素很多, 如加热介质、钢的成分、炉温、工件的形状及尺寸、装炉方式及装炉量等。通常根据经验公式估算或通过实验确定, 原则上要保证钢件“热透”, 即零件内外均达到同一温度。

3. 淬火冷却介质

冷却是淬火的关键工序, 它关系到淬火质量的好坏, 同时, 冷却也是淬火工艺中最容易出现问题的工序。淬火冷却是非常快的过程, 为了得到马氏体组织, 淬火冷却速度必须大于临界冷却速度 v_c 。但是, 在冷却速度快的情况下必然产生很大的淬火内应力, 这往往会引起工件变形。因此, 要结合过冷奥氏体的转变规律, 确定合理的淬火冷却速度, 使工件既能获得马氏体组织, 同时又要避免变形和开裂。理想淬火冷却曲线示意图如图 2-17 所示。

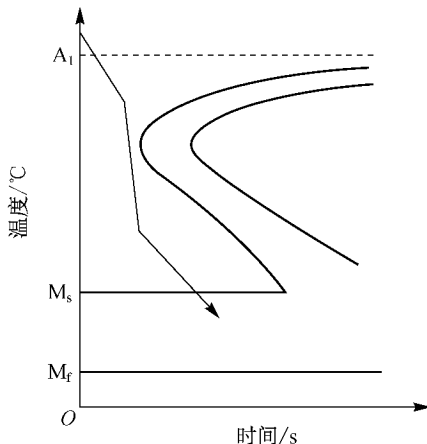


图 2-17 理想淬火冷却曲线示意图

4. 常用的淬火方法

由于淬火介质不能完全满足淬火质量的要求,所以应选择适当的淬火方法。在保证获得所要求的淬火组织和性能的条件下,尽量减小淬火应力,减少工件变形和开裂倾向。几种常用的淬火工艺特点及其用途见表 2-7。

表 2-7 常用的淬火工艺特点及其用途

类 型	主要工艺	特 点	用 途
单液淬火	将奥氏体状态的工件放入一种淬火介质中一直冷却到室温	操作简单,容易实现机械化、自动化,但是工件在马氏体转变温度区间冷却速度较快,容易产生较大的组织应力	适用于形状简单的碳钢和合金钢工件
双液淬火	先将奥氏体状态的工件在冷却能力强的淬火介质中冷却至接近 M_s 点温度,再立即转入冷却能力较弱的淬火介质中冷却,直至完成马氏体转变	优点是获得了较为理想的冷却条件,恰当控制在先冷却介质中的时间,在保证获得马氏体组织的同时,可以减小淬火应力,有效防止工件的变形和开裂	适合于碳钢制成的中型零件和由合金钢制成的大型零件
分级淬火	将奥氏体状态的工件先浸入温度略高于钢的 M_s 点的盐浴或碱浴炉中保温,当工件内外温度均匀后,取出空冷至室温,完成马氏体转变	大大减少热应力和组织应力,明显地减少变形和开裂	适合于截面尺寸比较小的工件,如刀具、量具和要求变形小的精密工件
等温淬火	将奥氏体化后的工件在稍高于 M_s 温度的盐浴或碱浴中冷却并保温足够时间	可以有效减少工件变形和开裂的倾向	适合于形状复杂、尺寸精度要求高的工具和重要机械零件,如模具、刀具、齿轮等较小尺寸的工件

5. 钢的淬透性和淬硬性

钢的淬透性表征钢淬火时形成马氏体的能力,一般以圆柱形试样的淬透层深度或沿截面的硬度分布曲线来表示。通常,将未淬透工件上具有高硬度的马氏体组织的这一层称为“淬硬层”。在同样的淬火条件下,淬硬层越深,表明钢的淬透性越好。淬透性是钢的重要热处理工艺性能,也是选材和制定热处理工艺的重要依据之一。而淬硬性是指钢淬火时能够达到的最高硬度,它主要取决于马氏体的含碳量。

6. 淬火缺陷及其预防措施

淬火时常见的缺陷有氧化、脱碳、硬度不足、过热、变形、开裂、软点等。其中,氧化、脱碳、过热、变形和开裂最为严重。

产生氧化、脱碳现象主要是由于加热介质中含有氧、二氧化碳、水蒸气等氧化性物质,在加热时它们与零件表面的铁或碳发生化学反应,生成氧化铁或使表面的碳燃烧。防止氧化、脱碳的方法是在箱式电炉及井式电炉中,通入保护性气体或滴入煤油、甲醇。目前,用涂料形式在零件表面涂以某种保护剂,同样能有效地防止零件氧化、脱碳。在盐浴炉中一般用硅胶来脱氧也能得到良好的效果。

硬度不足往往是由于加热不足、保温时间短或冷却缓慢造成的。高碳的钢件加热温度过高也会使硬度不足。所以要有针对性地采用合理的加热规范与正确的操作方法(如加热时零件之间留一定的间隙,冷却时加以搅拌等),就可以防止这种缺陷。

组织的晶粒粗大主要是由于加热温度过高而造成的。只有严格掌握温度,才能有效地

防止过热现象。

变形与开裂是热处理最严重的缺陷,产生这种缺陷的根本原因是内应力过大。当内应力大于材料的屈服点时,零件就产生塑性变形;内应力超过抗拉强度时,零件就发生开裂。具体地说,零件形状不对称、截面薄厚不均匀、原始组织不良、加热冷却不当、有尖棱尖角的形状等情况都会引起零件的变形或开裂。只有有针对性地采取措施,特别是选用合理的工艺参数,才能有效地防止这类缺陷的产生。

2.4.5 钢的回火

回火是把淬火钢加热到 A_{c1} 以下的某一温度保温后进行冷却的热处理工艺。除等温淬火的淬火钢外,都必须及时回火,回火是紧接着淬火进行的。

1. 淬火钢回火的目的

淬火钢回火的目的包括:

1) 减少或消除内应力

淬火钢内往往存在很大的内应力,并导致韧性下降、零件变形或开裂,回火可消除内应力,防止工件变形或开裂。

2) 获得工件所要求的力学性能

淬火钢件硬度高,脆性大,为满足各种工件不同的性能要求,可以通过适当回火来调整硬度,获得所需的塑性和韧性。

3) 稳定工件尺寸

淬火马氏体和残余奥氏体都是不稳定组织,会自发转变而引起工件尺寸和形状变化。通过回火可以使组织趋于稳定,以保证工件在使用过程中不再发生变形。

4) 改善某些合金钢的切削性能

某些高淬透性的合金钢,空冷就可以淬成马氏体,软化退火也相当困难,因此,常采用高温回火,使碳化物适当聚集,降低硬度,以利于切削加工。

2. 回火种类及应用

根据一般钢件的不同性能要求,按其回火温度范围,可将回火分为低温回火、中温回火和高温回火三种形式。三种类型回火工艺的特点以及用途见表 2-8。

表 2-8 回火的分类与用途

类 型	温度范围/℃	回火组织	回火目的	用 途
低温回火	150~250	回火马氏体	为了降低钢中残余应力和脆性,而保持钢在淬火后所得到的高硬度和耐磨性,硬度一般为 58~64 HRC	主要用于高碳钢、合金工具钢制造的工具、量具和模具、轴承零件;高强度钢制造的结构件,以及渗碳件和表面淬火零件
中温回火	350~500	回火托氏体	具有一定韧性的同时,兼有高的弹性极限和屈服强度,硬度为 35~45 HRC	用于各种弹簧的处理以及其他结构钢制造的有相应硬度要求的工装夹具
高温回火	500~650	回火索氏体	为了获得强度、塑性、韧性都较好的综合机械性能,硬度一般在 25~35 HRC	调质处理在交变载荷下工作的连杆、螺栓、齿轮及轴类等

一般习惯将淬火与高温回火相结合的热处理称为调质处理。调质处理广泛应用于各种重要的结构零件,特别是在交变载荷下工作的零构件,如连杆、螺栓、齿轮及轴类等。调质处理后得到回火索氏体组织,它的机械性能比相同硬度的正火索氏体组织优良,它的硬度取决于高温回火温度,并与钢的回火稳定性和工件截面尺寸有关。

除了以上三种常用的回火方法外,某些高合金钢还在 $640\sim 680\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行软化回火;某些量具等精密工件,为了保持淬火后的高硬度及尺寸稳定性,有时需在 $100\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行长时间($10\sim 50\text{ h}$)的加热。这种低温长时间的回火称为尺寸稳定处理或时效处理。

从以上各温度范围中可看出,回火没有在 $250\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内进行,因为在此温度范围钢容易发生低温回火脆性现象。

3. 淬火钢回火时的力学性能变化

1) 硬度变化

各种钢在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下回火时,硬度变化不大,保持淬火马氏体的高硬度。在 $200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火后,由于马氏体分解造成的硬度降低已由残余奥氏体转变为下贝氏体带来的硬度升高所补偿,所以硬度仍变化不大。

对于高碳钢,因为淬火后残余奥氏体量较多,回火后有时还可使硬度略有提高。回火温度继续升高,钢的硬度很快下降。对于碳钢,回火温度每升高 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,硬度约下降 10 HRC。

2) 强度与塑性的变化

40 钢的强度随回火温度升高而降低,塑性随回火温度升高而升高,但超过 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时反而降低。这是由于回火温度增高,马氏体中的碳不断析出,位错密度下降,内应力减小以及粒状渗碳体粗化等原因造成的。回火温度大于 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,由于组织过分粗化而使塑性下降。

2.4.6 钢的表面热处理

对于承受弯曲、扭转、摩擦或冲击的零件(如齿轮、凸轮和曲轴等),一般要求其表面具有高的强度、硬度、耐磨性及疲劳极限,而心部在保持一定强度、硬度的条件下,具有足够的塑性和韧性。这样的要求若依靠钢材的选择和普通的热处理方法是可能达不到的,解决的方法是对钢件进行表面热处理。表面热处理是指仅对钢件表层进行热处理,以改变其组织和性能的工艺。表面热处理主要包括钢的表面淬火和化学热处理两类。

1. 钢的表面淬火

钢的表面淬火是指在不改变钢的表层化学成分及心部组织的情况下使零件表层奥氏体化后进行淬火,以强化零件表面的热处理方法。表面淬火一般适用于中碳钢和中碳合金钢,虽然钢的含碳量过高可使表面的硬度、耐磨性提高,但心部的塑性和韧性会降低,使零件不耐冲击。相反,含碳量过低则会降低表面层的硬度和耐磨性。含碳量为 $0.4\%\sim 0.5\%$ 的中碳钢及铸铁是最适于表面淬火的材料。

表面淬火的加热方法应用最多的是感应加热和火焰加热。零件经表面淬火及低温回火后,表层组织为回火马氏体,心部组织仍为原来的回火索氏体(调质)或铁素体+索氏体(正火)组织。

1) 感应加热表面淬火

感应加热表面淬火是采用一定方法使工件表面产生一定频率的感应电流,将工件表面

迅速加热然后迅速淬火冷却的一种热处理操作方法。

(1)感应加热的基本原理。感应加热表面淬火的装置如图 2-18 所示,主要由电源、感应器及淬火喷水套等组成。当感应器中通入高频交变电流时,所产生的交变磁场使放入感应器内的工件内部感生出巨大的涡流。感应电流在工件表层密度最大,而心部密度几乎为零,这种现象称为“集肤效应”。由于钢件本身具有电阻,因而集中于表层的电流可使表层被迅速加热,几秒钟内温度可升至 $800\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$,而心部几乎未被加热,在随后的喷水冷却时工件表层即被淬硬。

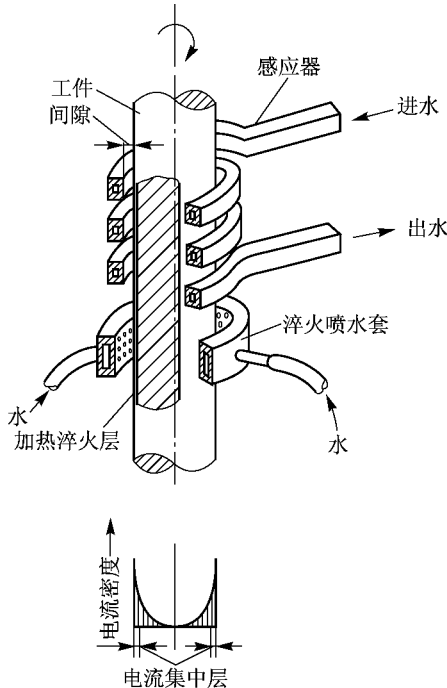


图 2-18 感应加热表面淬火示意图

(2)感应加热表面淬火的特点。与普通加热淬火相比,感应加热表面淬火在工业上的应用更广泛,原因是感应加热表面淬火有以下优点:

①感应加热速度极快,一般只需几秒至几十秒时间就可使工件达到淬火温度。由于快速加热,使相变临界点(Ac_1 、 Ac_3)升高,转变温度范围扩大但转变所需时间缩短。

②工件表层获得极细小的马氏体组织,使工件表层具有比普通淬火稍高的硬度且脆性较低,具有较高的疲劳强度。

③工件表面质量好。由于快速加热,工件表面不易氧化、脱碳,且淬火时工件变形小。

④生产效率高,便于实现机械化、自动化。淬硬层深度也易于控制。

同时,感应加热表面淬火也存在工艺设备较贵,维修调整困难,适用于形状复杂零件的感应器不易制造等缺点。

感应加热表面淬火零件的一般加工工艺路线:下料—退火或正火—锻造—粗加工—调质或正火—精加工—感应加热表面淬火—低温回火—精磨—时效($100\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10\sim 15\text{ h}$ 加热,以稳定工件尺寸,消除内应力)—精磨—成品。

(3)感应加热表面淬火的注意事项。感应加热表面淬火零件的预先热处理工艺有调质

和正火两种,调质处理后工件的力学性能比正火的好。然而当心部性能要求不高时,一般可采用正火作为预先热处理。

感应加热表面淬火后工件必须随即进行低温回火。低温回火一般在 $170\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的炉中进行,也可采用“自回火”方式,即当淬火冷至 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时停止喷水,利用工件中的余热传到表面而达到回火目的。

2) 火焰加热表面淬火

火焰加热表面淬火是利用氧-乙炔或煤气-氧的混合气体燃烧的高温火焰($3\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上),将零件表面加热到淬火温度,然后喷水冷却的热处理工艺方法。

火焰加热表面淬火的淬硬层深度一般为 $2\sim 6\text{ mm}$ 。它具有工艺及设备简单、操作简便、成本低、淬火速度快、变形小等优点。但生产率低,工件表面易过热,淬火质量不稳定,所以使用上有一定局限性。

2. 化学热处理

化学热处理是将工件置于某种化学介质中,通过加热、保温和冷却使介质中某些元素渗入工件表面以改变工件表面层的化学成分和组织,从而使其表面与心部具有不同的特殊性能的一种热处理工艺。

与表面淬火相比较,化学热处理的主要特点是工件表面层组织不仅有变化,而且化学成分也有变化。

化学热处理的方法较多,由于渗入的元素不同,会使工件表面具有不同性能。可根据工件的工作条件和对性能的要求选用不同的方法。例如,渗碳、碳氮共渗可提高钢的硬度、耐磨性及疲劳强度;氮化、渗硼、渗铬使工件表面硬度增加,耐磨性和耐腐蚀性显著提高;渗铝可提高耐热抗氧化性;渗硫可提高减磨性;渗硅可提高耐酸性等。

1) 化学热处理的基本过程

常用的化学处理方法包括渗碳、渗氮和碳氮共渗等几种形式。无论哪种形式的化学热处理,元素渗入零件表层均由介质分解、工件表面吸收和原子扩散三个基本过程所组成。在化学热处理过程中,只有活性原子才能为工件表面所吸收。化学介质在一定温度下分解生成活性原子。例如,渗碳时 CO 或 CH_4 分解出活性碳原子;渗氮时由 NH_3 分解生成活性氮原子。分解出来的活性原子由零件表面进入铁晶格,其必要条件就是渗入元素在基体金属中有较大的可溶性;当超过溶解度后还会形成化合物。溶入元素的原子在浓度梯度的作用下由表及里扩散,形成一定厚度的扩散层。

2) 钢的渗碳

钢的渗碳是向低碳钢或低碳合金钢表层渗入碳原子,以提高钢件表层含碳量,使之具有高硬度和高耐磨性,中心部仍保持良好韧性的热处理过程。

渗碳广泛用于在磨损情况下工作并承受冲击载荷、交变载荷的工件,如汽车、拖拉机的传动齿轮,内燃机的活塞销等。

(1) 渗碳方法。根据渗碳剂的不同,渗碳方法分为固体渗碳、气体渗碳、真空渗碳和液体渗碳等。

固体渗碳法是将工件置于四周填满固体渗碳剂的箱中,用盖和耐火泥将箱密封后,送入炉中加热至渗碳温度 $900\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温一定时间使工件表面渗碳。常用的固体渗碳剂是碳粉和碳酸盐(BaCO_3 或 Na_2CO_3 等)的混合物。固体渗碳的优点是操作简单,设备费用低,大、小零件都可用。其缺点是渗碳速度慢,生产效率低,劳动条件差,渗碳后不宜直

接淬火。

气体渗碳法是将工件置于特制的渗碳炉中,并在高温(900~950℃)渗碳气体中进行加热、保温,使工件表面层增碳的过程。常用的气体渗碳剂是裂化混合气体(天然气或煤气)和有机液体(煤油、苯、甲醇、丙酮等)等,它们在高温下能裂解成渗碳气体。此法的优点是生产效率高,渗层质量好,劳动强度低,便于直接淬火。缺点是渗碳量及渗层深度不易精确控制,电力消耗大等。

真空渗碳法是将零件放入特制的真空渗碳炉中,先抽真空使之达到一定真空度,然后将炉温升至渗碳温度,再通入一定量的渗碳气体进行渗碳。由于渗碳炉中无氧化性气体等其他不纯物质,零件表面无吸附的气体,因而表面活性大,通入渗碳气体后,渗碳速度快,渗碳时间约为气体渗碳的三分之一,而且表面光亮。

3) 钢的渗氮

渗氮也称氮化,是指向工件表面渗入氮原子,以形成高氮硬化层的化学热处理工艺,其目的是提高表面硬度、耐磨性、疲劳强度和耐腐蚀性。

钢的氮化方法种类很多,包括气体氮化法和离子氮化法等。目前应用最广泛的是气体氮化法。

气体氮化是利用氨气加热时分解出的活性氮原子被钢件表面吸收、扩散形成渗氮层,同时向心部扩散。氮化通常在井式电阻炉内进行。氨的分解在200℃以上开始,同时因为铁素体对氮有一定的溶解能力,所以气体氮化一般都是在不超过钢的 A_1 温度(500~570℃)下进行的。气体氮化的缺点是处理温度低,渗氮所用的时间长。

离子氮化是目前正大力推广的一种先进工艺。它的基本原理是在低真空度的容器内,保持氮气的压强为 $(1\sim 10)\times 133.32\text{ Pa}$,在400~700V的直流电压作用下,迫使电离后的氮离子高速冲击工件(阴极),使其渗入工件表面。

离子氮化的优点是处理周期短,仅为气体氮化时间的 $1/4\sim 1/3$ 。例如,38CrMnAl钢,氮化层深度若达到0.53~0.7mm,气体氮化一般需70h,而离子氮化仅需15~20h,且零件的表面不易形成连续的白色脆性层。

钢的氮化也存在工艺复杂、成本高、氮化层薄等缺点。目前主要用于耐磨性和精度均要求很高的零件或要求耐热、耐磨及耐腐蚀的零件。例如,高精度机床丝杠、机床主轴、精密传动齿轮和轴、汽轮机阀门和阀杆、发动机汽缸和排气阀以及热作模具等。

4) 碳氮共渗

因早期采用含氰根的盐浴作溶剂来产生活性碳、氮原子,故碳氮共渗又有“氰化”之称,它是将碳和氮同时渗入工件表层的化学热处理工艺。

碳氮共渗按处理温度分为高温气体碳氮共渗、中温气体碳氮共渗和低温气体氮碳共渗。共渗层的碳、氮含量主要取决于共渗温度。共渗温度低时,以渗氮为主,随着共渗温度的升高,共渗层的含氮量减少,而含碳量增加。高温气体碳氮共渗与渗碳相似,应用较少。目前,以中温气体碳氮共渗和低温气体碳氮共渗应用较广泛。中温气体碳氮共渗的主要目的是提高钢件的硬度,低温气体碳氮共渗则以提高钢件的耐磨性和抗胶合性为主。

(1)中温气体碳氮共渗以渗碳为主,其工艺与渗碳相似。最常用的方法是在井式气体渗碳炉内滴入煤油,并通入氨气,在共渗温度下,煤油和氨除了前述的渗碳和氮化的作用外,它们之间相互作用还生成了碳和氮活性原子。活性碳、氮原子被工件表面吸收并向内扩散形成共渗层。由于氮能扩大 γ 相区,并能增加碳的扩散速度,故共渗温度比单纯渗碳

低,渗速也较快,一般共渗温度为 $820\sim 860\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温时间取决于要求的共渗层深度,其关系见表2-9。

表2-9 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 碳氮共渗的共渗层深度与共渗时间的关系

共渗时间/h	1~1.5	2~3	4~5	7~9
共渗层深度/mm	0.2~0.3	0.4~0.5	0.6~0.7	0.8~0.9

与渗碳相比,碳氮共渗层的硬度与渗碳层接近或略高于渗碳层,耐磨性和疲劳强度则优于渗碳层。碳氮共渗因具有处理温度低、变形小、生产周期短等优点,目前常用于处理形状较复杂、要求热处理变形小的小型零件,如缝纫机、纺织机零件及各种轻载齿轮等。

(2)低温气体碳氮共渗也称“气体软氮化”。由于处理温度低,实际以渗氮为主。但因为活性碳原子与活性氮原子同时存在,渗氮速度大为提高,一般保温时间为 $1\sim 3\text{ h}$,渗层深度为 $0.01\sim 0.02\text{ mm}$ 。

工件经氮碳共渗后,其共渗层的硬度比纯气体氮化低,但仍具有较高的硬度、耐磨性和疲劳强度,韧性好而不易剥落,并有减磨的特点。在润滑不良和高磨损条件下,有抗胶合、抗擦伤的优点,耐磨性也有明显提高。由于处理温度低,时间短,所以零件变形小。

氮碳共渗不受钢种限制,适用于碳钢、合金钢和铸铁等材料,可用于处理各种模具以及其他耐磨件。

2.4.7 钢的其他热处理

1. 真空热处理

所谓真空是指压力较正常大气压小(即负压)的任何气态空间。若将热处理的加热和冷却过程置于真空中进行,就称为真空热处理。在真空的状态下,负压的程度称为真空度。气压越低,真空度越高;反之,真空度越低。根据真空度的大小,通常可将其分为四级: $133.3\times(10^{-2}\sim 10)\text{ Pa}$ 称为低真空; $133.3\times(10^{-4}\sim 10^{-3})\text{ Pa}$ 称为中真空; $133.3\times(10^{-7}\sim 10^{-5})\text{ Pa}$ 称为高真空; $133.3\times 10^{-8}\text{ Pa}$ 以下称为超高真空。通常工件热处理加热的真空度为 $133.3\times(10^{-2}\sim 10^{-1})\text{ Pa}$ 。真空热处理的基本特点如下:

1) 加热速度缓慢,工件变形小

工件在真空中加热,热量的传递主要以辐射方式进行,加热速度缓慢,工件截面温差小,故工件变形较小。

2) 氧化作用被抑制

对于许多贵重金属(钨、钛、铌、钽、锆)及其合金、精密合金、铜合金等,在一般可控制的气体中加热和冷却时,要保持加热气体完全呈中性状态是很困难的。在真空中加热,随着真空度的提高,氧气变稀薄,氧化作用被抑制,可以实现无氧化加热的光亮热处理。

3) 表面净化

在高真空状态下,由于氧分解压极低,金属氧化物产生如下的分解反应: $2\text{MO}\rightarrow 2\text{M}+\text{O}_2$ (M代表金属),形成的氧气由真空泵排出。如果工件表面附着油脂等污物,在真空加热中也将会挥发,起到脱脂作用,这样不仅可以得到洁净光亮的表面,而且对提高工件的耐磨性、疲劳强度等都有明显的效果。

4) 脱气作用

溶解在金属中的气体量随温度的变化而变化,若在真空中加热,当温度升高到 800 °C 以上时,溶于钢中的氢、氮以及氧化物分解的气体逸出,产生脱气作用。

5) 蒸发现象

合金钢在真空中加热时,某些蒸气压高的合金元素在真空状态下将产生挥发现象。如蒸气压较高的 Mn、Cr 等元素,当真空度为 133×10^{-4} Pa 时,Mn 的熔点降至 825 °C, Cr 的熔点降至 1 040 °C,真空加热温度高于其熔点时就会挥发,既影响工件的性能,也容易损坏真空加热炉。因此,在高真空中高温加热时,要特别重视金属的蒸气压。通常采用通入高纯度的惰性气体并将真空度降至 27~200 Pa 的方法来防止发生这种现象。

另外,真空热处理的设备复杂、庞大,价格较昂贵。目前主要用于钢的退火、淬火、回火及渗碳方面。

2. 形变热处理

形变热处理是将塑性变形和热处理有机结合,以提高材料力学性能的复合工艺,其目的是使形变强化与相变强化结合起来,获得比普通热处理更高的强韧化效果,同时可简化工序和节能。

形变热处理通常分为相变前形变、相变中形变和相变后形变三种类型。常用的几种形变热处理包括:

1) 高温形变淬火

高温形变淬火是在奥氏体稳定区进行形变,随后淬火获得马氏体组织的热处理工艺。目前生产中采用的锻后余热淬火、热轧淬火等就是这种类型。这种工艺对结构钢和工具钢均适用,能获得较明显的强韧化效果,与普通淬火相比能提高抗拉强度 10%~30%,提高塑性 40%~50%,冲击韧性则成倍提高。但由于形变温度远远高于再结晶温度,形变强化效果则易被再结晶过程所削弱。

2) 高温形变等温淬火

高温形变等温淬火是在奥氏体稳定区形变,随后在贝氏体区等温淬火,获得贝氏体组织的热处理工艺。其抗拉强度、塑性与韧性等也高于普通淬火。

3) 低温形变淬火

低温形变淬火是在奥氏体化后,迅速冷却至亚稳奥氏体区(500~600 °C)形变,随后淬火,获得马氏体组织的热处理工艺。它的特点是在保证一定塑性的条件下,大幅度地提高强度。可以使高强度结构钢的抗拉强度由一般淬火、回火的 180 MPa 提高到 250~280 MPa。

4) 低温形变等温淬火

低温形变等温淬火是采用与低温形变淬火相同的加热和形变条件,但随后在贝氏体区进行等温淬火,以获得贝氏体组织。采用这种工艺得到的强度略低于低温形变淬火,但其塑性却提高,适用于热作模具及高强度钢制作的小型零件。

3. 表面气相沉积

为了提高零件的耐磨性、减缓材料的腐蚀,材料表面性能优化技术越来越被重视。其中表面气相沉积是一种发展较快、应用最广的表面涂覆新技术,它是气相中的纯金属或化合物在零件表面沉积,形成具有特殊性能膜层的方法。

根据成膜过程的机理不同,表面气相沉积可分为化学气相沉积(CVD)和物理气相沉积(PVD)两种。

在机械工业中,常在高速钢刀具、硬质合金刀具、各种模具以及耐磨结构件上沉积 TiC、TiN、Al₂O₃ 等超硬涂层,可使其寿命提高几倍。TiC 硬度(2 980~3 800 HV)很高,但韧性较差,和钢材的热膨胀系数差异较大。TiN 硬度(2 400 HV)较 TiC 低,但韧性好,和钢材的热膨胀系数差异小,有利于膜与基体间的结合,且与钢材间摩擦系数小,具有干润滑、抗粘着及抗磨损等优点,故 TiN 涂覆层应用更广泛。为了得到 TiC 的高硬度和 TiN 的韧性,近年又发展了 TiCN 涂覆层,可使沉积温度降低到 350 °C,故很有实用价值。

2.5 铸 铁

铸铁是指含碳量大于 2.11% 的铁碳合金,工业上常用的铸铁都不是简单的二元合金,而是以 Fe、C、Si 为主要元素的多元合金。普通铸铁的成分范围是含碳 2.5%~4.0%,含硅 1.0%~3.0%,含锰 0.5%~1.4%,含磷 0.01%~0.5%,含硫 0.02%~0.2%。有时为了提高铸铁的机械、物理和化学性能,还加入一定量的合金元素,如 Cr、Mo、Cu、Al 等。在成分上,铸铁与钢的主要差异是铸铁含碳和硅的量较高,含杂质元素硫、磷较多。

铸铁是一种成本低廉并具有良好性能金属材料。与钢相比,虽然铸铁的机械性能,特别是抗拉强度及韧性、塑性较低,但由于它具有优良的减振性、耐磨性、耐腐蚀性、铸造性及切削加工性,而且生产设备工艺简单,因此在工业上得到广泛的应用。如按质量计算,在汽车、拖拉机上,铸铁件占 50%~70%;在机床及重型机械中,铸铁件则可高达 60%~90%。不少过去使用碳钢和合金钢制造的零件,如今也可以用球墨铸铁制造,这不仅节约了大量的优质钢材,而且大大降低了产品的成本。

铸铁的性能是与其内部组织密切相关的,铸铁中碳的存在形式及石墨形态、分布和数量,对铸铁的性能有着重要的影响。根据铸铁中碳的形态来分类,铸铁可以分为五种基本类型,即白口铸铁、可锻铸铁、灰铸铁、球墨铸铁和蠕墨铸铁。此外,还有合金铸铁,合金铸铁的化学成分范围很宽,它包含有大量的其他元素。

2.5.1 铸铁的石墨化

1. 铸铁中石墨的作用

铸铁组织中石墨的存在,不仅割断了基体的连续性,而且在其尖端处还会引起应力集中。所以铸铁的抗拉强度、塑性和韧性远不如钢。石墨片的量越多,尺寸越大,其影响也越大,但石墨的存在对铸铁的抗压强度影响不大,因为铸铁的抗压强度和硬度主要取决于基体组织的性能。因此,为了得到较高的强度,在灰铸铁中,以珠光体为基体的铸铁应用最广。

铸铁组织中的石墨虽然降低铸铁的抗拉强度和塑性,但却给铸铁带来一系列的其他优越性能。如铸铁优良的铸造性,不仅表现在它具有较高的流动性,而且还因为铸铁在凝固过程中会析出比容较大的石墨,从而可以减小其收缩率;由于石墨具有割裂基体连续性的作

用,从而使铸铁的切屑易脆断,具有良好的切削加工性;由于石墨本身具有润滑作用,以及当它从铸件表面上掉落时所遗留下的孔洞具有存油的能力,故铸铁又有优良的减磨性。此外,石墨的组织松软,能够吸收振动,因而又使铸铁具有良好的减振性,加之片状石墨本身就相当于许多微缺口,故铸铁具有较低的缺口敏感性。

2. 铸铁的石墨化

铸铁的石墨化过程是铸铁中碳原子析出和形成石墨的过程,而铸铁组织形成的基本过程主要也就是石墨形成的过程。石墨可以从液相中直接结晶出来,或从奥氏体及铁素体中脱溶沉淀出来,又可以由渗碳体分解而成。因此,渗碳体实际上是一个亚稳定相,石墨才是稳定相。

3. 影响铸铁石墨化的因素

铸铁的石墨化程度受许多因素影响,铸铁的化学成分和结晶过程中的冷却速度是影响石墨化的主要因素。

铸铁中的碳和硅能促进石墨化进程,此外,铸铁中的 Al、Ni、Ti、Co、P、Cu 等元素也是促进石墨化的元素,而 Mn、Mo、Cr、W、Mg 等元素属于阻碍石墨化的元素。Cu 和 Ni 既促进共晶时的石墨化,又能阻碍共析时的石墨化。生产中为了避免产生白口或麻口,铸铁中必须加入足量的 C、Si、Al 等促进石墨化的元素。

铸件的冷却速度对石墨化进程也有明显的影响。一般来说,铸件冷却速度越缓慢,越有利于石墨化进程充分进行。反之,铸件冷却速度越快,原子扩散能力越弱,就越有利于按照 Fe-Fe₃C 系相图进行结晶和转变而得到白口铸铁。这样不利于石墨化的进行,尤其是在共析阶段的石墨化,由于温度较低,冷却速度增大,原子扩散更加困难。所以,在通常情况下,共析阶段的石墨化(即第二阶段石墨化)难以进行。

2.5.2 灰铸铁

1. 灰铸铁的成分

灰铸铁的成分大致范围为含碳 2.5%~4.0%,含硅 1.0%~2.2%,含锰 0.5%~1.3%,含硫 0.02%~0.15%,含磷 0.05%~0.3%。将具有上述成分范围的液体铁水进行缓慢冷却凝固时,会发生石墨化,析出片状石墨,由于其断口呈浅烟灰色,故称为灰铸铁。

普通灰铸铁的组织是由片状石墨和钢的基体两部分组成的。在光学显微镜下观察,石墨呈不连续的片状,或直或弯。基体则可分为铁素体、铁素体+珠光体、珠光体三种。

实际应用的灰铸铁主要是以珠光体为基体的。随着基体中珠光体含量的增加和珠光体的细化,铸铁的强度、硬度和耐磨性将提高。通常将珠光体分为粗片状的、中等片状的、细片状的和极细片状的等数种。灰铸铁中铁素体的出现会使铸铁的强度、耐磨性和耐蚀性等性能降低。铁素体含量越多,分布越集中,其影响也越大。因此,有些铸件要求将基体中的铁素体量控制在一定范围内,并且不允许铁素体聚集分布。

铸铁中含磷量较多,在实际铸造条件下,磷常以 Fe₃P 的形态与铁素体和 Fe₃C 形成硬而脆的磷共晶。如果磷共晶在奥氏体晶界成连续网状分布,则会使铸铁的强度和韧性显著降低。而少量均匀孤立分布的磷共晶,不仅不影响强度,而且有利于提高耐磨性。磷共晶如果分布较集中或较粗大时,不仅使铸铁强度、韧性降低,而且容易剥落,引起零件更大的磨损。

2. 灰铸铁的牌号及用途

我国灰铸铁的牌号、性能及用途见表 2-10。灰铸铁的牌号由“HT+数字”组成,其中,“HT”表示“灰铁”二字的汉语拼音字首,数字代表直径为 30 mm 试棒的最低抗拉强度值。

表 2-10 灰铸铁的牌号、性能及用途

牌 号	铸件壁厚 /mm	最小抗拉 强度/MPa	硬度/HBS	显微组织		使用场合
				基体	石墨	
HT100	2.5~10	130	≤170	F+P(少量)	粗片状	低载荷和不重要的零件, 如盖、外罩、手轮、支架等
	10~20	100				
	20~30	90				
	30~50	80				
HT150	2.5~10	175	150~200	F+P	较粗片状	承受中等应力(抗弯应力 小于 100 MPa)的零件,如 支柱、底座、齿轮箱、工作 台、阀体、曲轴、变速器壳等
	10~20	145				
	20~30	130				
	30~50	120				
HT200	2.5~10	220	170~200	P	中等片状	承受较大应力和较重要 的零件,如汽缸体、缸盖、机 座、车身、齿轮箱、制动毂、 联轴器等
	10~20	195				
	20~30	170				
	30~50	160				
HT250	4.0~10	270	190~240	细珠光体	较细片状	
	10~20	240				
	20~30	220				
	30~50	200				
HT300	10~20	290	210~260	索氏体或托氏体	细小片状	承受高弯曲应力(小于 500 MPa)及拉应力的重要 零件,如大型发动机曲轴、 车床卡盘、齿轮、凸轮和高 压液压缸、滑阀壳体等
	20~30	250				
	30~50	230				
HT350	10~20	340	230~280			
	20~30	290				
	30~50	260				

从表中可以看出,灰铸铁的强度与铸件的壁厚有关,铸件壁厚增加则强度降低,这是由于壁厚增加使冷却速度降低,造成基体组织中铁素体增多而珠光体减少。因此,在根据性能要求选择铸铁牌号时必须注意到铸件的壁厚。

3. 灰铸铁的热处理

对灰铸铁热处理的主要目的是通过改善铸铁的基体组织来提高铸件的性能的。热处理一般不能改善原始组织中石墨的形态和分布状况。对于灰铸铁来说,由于基体截面积显著减小和石墨的应力集中效应对性能起主导作用,因此,要对其施以强化型热处理。灰铸铁的热处理形式主要有退火、正火和表面热处理。

1) 消除内应力的退火

铸件在铸造冷却过程中容易产生内应力,可能导致铸件翘曲和裂纹。为了保证尺寸的稳定性,防止变形开裂,对一些形状复杂的铸件,如机床床身、柴油机汽缸等,往往要进行消除内应力的退火处理(又称时效处理)。

2) 消除铸件白口及改善切削加工性的退火

灰口铸铁的表层及一些薄截面处,在冷凝后往往产生白口,使硬度增加,切削加工困难,这就需要进行退火处理。工艺规程是将厚壁铸件加热至 $850\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温 $2\sim 3\text{ h}$;薄壁铸件加热至 $800\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温 $2\sim 5\text{ h}$ 。

冷却方法应根据性能要求而定。如果主要是为改善切削加工性,可采用炉冷缓慢冷却;若需要提高铸件的耐磨性,可采用空冷以得到珠光体为主要基体的灰铸铁。

3) 高(中)频感应加热表面淬火

为了提高某些铸件(如机床床身导轨)的表面硬度,可采用表面淬火。高(中)频感应加热表面淬火是生产中应用较广的方法,淬火后的表面硬度可达 $50\sim 55\text{ HRC}$ 。

2.5.3 球墨铸铁

球墨铸铁是 20 世纪 50 年代发展起来的一种铸铁材料,通过在浇铸前向铁水中加入一定量的球化剂(如镁、钙及稀土元素等)进行球化处理,并加入少量的孕育剂(硅铁或硅钙合金)以促进石墨化,在浇铸后可直接获得具有球状石墨结晶的铸铁,即球墨铸铁。

由于球墨铸铁具有优良的机械性能、加工性能和铸造性能,生产工艺简便,成本低廉,因此得到了越来越广泛的应用。

1. 球墨铸铁的成分

球墨铸铁的组织特征是在钢基体上分布着球状石墨。常见的基体组织有铁素体、珠光体和铁素体+珠光体三种。通过合金化和热处理后还可以得到下贝氏体、马氏体、托氏体、索氏体和奥氏体等基体组织的球墨铸铁。其中应用最广泛的是铁素体球墨铸铁和珠光体球墨铸铁,铁素体+珠光体球墨铸铁则应用得较少。珠光体球墨铸铁的一般成分范围是含碳 $3.6\%\sim 3.8\%$,含硅 $2.0\%\sim 2.8\%$,含锰 $0.6\%\sim 0.8\%$,含磷少于 0.1% ,含硫少于 0.07% ,含镁 $0.03\%\sim 0.5\%$,含稀土元素 $0.02\%\sim 0.04\%$ 。

球墨铸铁的组织特点是其石墨的形态比可锻铸铁更为圆整,因而对基体的强度、塑性和韧性的影响更小。球墨的数量越少,越细小,分布越均匀,球墨铸铁的机械性能便越高,即铸铁基体强度的利用率越高。在球墨铸铁中,基体强度的利用率可达 $70\%\sim 90\%$,而在灰铸铁中,基体强度的利用率仅为 $30\%\sim 50\%$ 。故球墨铸铁的强度、塑性和韧性都远远超过灰铸铁,甚至优于可锻铸铁。

球墨铸铁不仅具有远远超过灰铸铁的机械性能,而且同样也具有灰铸铁的一系列优点,如良好的铸造性、减磨性、切削加工性及较低的缺口敏感性等,甚至在某些性能方面可与锻钢相媲美,如疲劳强度大致与中碳钢相近,耐磨性优于表面淬火钢等。此外,球墨铸铁还适应各种热处理,可使其机械性能提高到更高的水平。

2. 球墨铸铁的牌号和用途

我国关于球墨铸铁牌号的表示采用“QT+数字-数字”形式。“QT”为“球铁”两字的汉语拼音头字母,第一组数字代表最低抗拉强度值(MPa),第二组数字代表最小拉伸后延伸率值(%)。常用的球墨铸铁牌号、性能及用途见表 2-11。

表 2-11 常用的球墨铸铁牌号、性能及用途

牌 号	基体组织	力学性能				应用举例
		σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	硬度/HBS	
		不小于				
QT400-18	F	400	250	18	130~180	承受冲击、振动的零件,如汽车、拖拉机的轮毂、驱动桥壳、差速器壳、拨叉、压缩机上的高低压汽缸、齿轮箱、飞轮壳等
QT400-15	F	400	250	15	130~180	
QT450-10	F	450	310	10	160~210	
QT500-7	F+P	500	320	7	170~230	机器底座、传动轴、飞轮、内燃机泵齿轮、铁路机车轴瓦
QT600-3	F+P	600	370	3	190~270	载荷大、受力复杂的零件,如汽车、拖拉机的曲轴、连杆、凸轮轴、汽缸套,部分车床、铣床、磨床的主轴,机床蜗杆、蜗轮,桥式起重机大小滚轮等
QT700-2	P	700	420	2	225~305	
QT800-2	P或回火组织	800	480	2	245~335	
QT900-2	B或M _回	900	600	2	280~360	高强度齿轮,如汽车后桥螺旋锥齿轮、大减速器齿轮、内燃机曲轴、凸轮轴等

3. 球墨铸铁的热处理

1) 正火

正火是为了获得珠光体组织,并使晶粒细化,组织均匀,从而提高零件的强度、硬度及耐磨性。正火的冷却方式除了空冷以外,还常采用风冷、喷雾冷却等方式来加快冷却速度,从而提高珠光体数量。为了消除正火时铸件的内应力,在正火后通常再进行一次 550~600℃ 的去应力处理。

2) 淬火及回火

为了提高球墨铸铁件的力学性能,可将球墨铸铁进行淬火和回火处理。回火温度分三种:低温回火(150~250℃)、中温回火(350~500℃)、高温回火(500~600℃)。淬火及回火后的组织除有球状石墨外,其他与碳钢相同。

3) 等温淬火

为了满足日益发展的高速、大功率机器中受力复杂件(如齿轮、曲轴、凸轮轴等)的要求,常把球墨铸铁件进行等温淬火来提高它的综合力学性能。等温处理的温度主要以所要求的力学性能而定。一般认为下贝氏体的综合力学性能最好,故球墨铸铁常用的等温处理的温度为 250~350℃。

4) 化学处理

对于要求表面耐磨或抗氧化、耐腐蚀的球墨铸铁件,可以采用类似于钢的化学热处理,如气体氮化、渗硼和渗硫等。

2.5.4 可锻铸铁

可锻铸铁是白口铸铁经石墨化退火而形成的一种铸铁,由于铸铁中石墨呈团絮状分布,对基体破坏作用减弱,因而较之灰铸铁具有更高的力学性能,尤其是具有较高的塑性和韧性,故被称为可锻铸铁。实际上可锻铸铁不能锻造,主要用来制作一些形状复杂而且在工作

中承受冲击振动的薄壁小型铸件。

1. 可锻铸铁的成分

根据可锻铸铁的生产特点,铸铁中的化学成分既要满足形成白口铸铁的需要,又要满足石墨化的需要。事实上,铸件容易获得白口则会延缓石墨化过程,而促进石墨化的因素往往阻碍形成白口。所以,可锻铸铁化学成分的选择要综合考虑这一对矛盾,以达到相辅相成的效果。

可锻铸铁按基体组织不同分为铁素体可锻铸铁和珠光体可锻铸铁。铁素体可锻铸铁因其断口中心呈暗灰色,表层呈灰白色而称为“黑心可锻铸铁”。若在氧化性介质中进行石墨化退火,由于表层完全脱碳,得到铁素体组织,心部为珠光体基加团絮状石墨,断口呈现表层暗灰色、中心灰白色,故称为“白心可锻铸铁”。

目前,我国以生产黑心铁素体可锻铸铁为主。白心可锻铸铁因为其韧性差、退火周期长等原因应用极少。

2. 可锻铸铁的牌号及用途

可锻铸铁的牌号由“KTH+数字-数字”或“KTZ+数字-数字”组成。“KTH”和“KTZ”分别代表“黑心可锻铸铁”与“珠光体可锻铸铁”。第一组数字表示最低抗拉强度(MPa),第二组数字表示最小伸长率(%)。常用的可锻铸铁的牌号、性能及用途见表 2-12。

表 2-12 常用的可锻铸铁的牌号、性能及用途

牌 号	力学性能				应用举例
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	硬度/HBS	
	不小于				
KTH300-06	300	186	6	≤ 150	弯头、三通管件、中低压阀门等
KTH330-08	330	—	8	≤ 150	扳手、犁刀、犁柱、车轮壳等
KTH350-10	350	200	10	≤ 150	汽车拖拉机前后轮壳、差速器壳、转向节壳、制动器等
KTH370-12	370	226	12	≤ 150	
KTZ450-06	450	270	6	150~200	载荷较高和耐磨损零件,如曲轴、凸轮轴、连杆、齿轮、活塞环、轴套、耙片、万向接头、棘轮、扳手、传动链条等
KTZ550-04	550	340	4	180~250	
KTZ650-02	650	430	2	210~260	
KTZ700-02	700	530	2	240~290	

3. 可锻铸铁的热处理

可锻铸铁石墨化退火周期很长,一般需要 70~90 h,甚至上百小时。为了提高生产率、降低成本,常采用以下方法缩短退火周期:

1) 低温时效

铸件退火前先在 300~400 °C 范围内加热保温 3~6 h,这样可显著缩短整个退火周期并能使石墨团径变小。其原因是在低温保温(时效)过程中发生了碳原子的偏聚,退火时这种偏聚能促进形成石墨核心。此外,在白口铸铁中存在着氢,氢能减慢碳的扩散速度,并使渗碳体的稳定性增加,而且低温时效可引起氢的逸出,促使铸铁石墨化,从而可缩短整个可锻铸铁石墨化退火时间。

2) 孕育处理

石墨化退火时间长已经成为制约可锻铸铁发展的主要问题。近年来,在生产中创造了不少缩短退火周期的新工艺,其中在制取白口铸铁时对铁液进行复合孕育处理,效果显著,应用最广。复合孕育处理时所使用的复合孕育剂中,一种元素的作用是在铸件凝固时阻碍石墨化,保证得到全白口组织,而另一种元素对退火时的石墨化没有强烈阻碍作用,从而缩短退火时间。目前,广泛采用的工艺有低温时效和加铝孕育、硼-铈孕育、铈-铝孕育、硅-铈孕育以及稀土-铈复合孕育处理等方法。例如,用硼-铈孕育处理工艺生产汽车后桥壳的退火时间已经缩短到 20 h 左右,效果十分显著。

2.5.5 蠕墨铸铁

蠕墨铸铁是近十多年来发展迅速的一种新型铸铁材料。

1. 蠕墨铸铁的组织特征

蠕墨铸铁的组织由钢的基体和蠕虫状的石墨组成。石墨形状介于片状和球状之间,在光学显微镜下观察,石墨短而厚,头部较圆,形似蠕虫。

2. 蠕墨铸铁的性能特点

蠕墨铸铁的力学性能介于灰铸铁和球墨铸铁之间;强度、塑性、韧性优于灰铸铁,接近于铁素体球墨铸铁;壁厚敏感性比灰铸铁小得多,故厚、大截面上的力学性能均匀。突出的优点是屈服强度在铸造合金中最高;导热性、铸造性、切削加工性、耐磨性优于球墨铸铁,接近于灰铸铁。

3. 蠕墨铸铁的牌号、力学性能和应用

蠕墨铸铁的牌号、力学性能和应用见表 2-13,其中“RuT”为“蠕铁”汉语拼音字头,后面数字为最小抗拉强度值。

表 2-13 蠕墨铸铁的牌号、力学性能和用途

牌 号	力学性能				应用举例
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta\%$	硬度/HBS	
	不小于				
RuT260	260	195	3	121~197	增压器进气壳体、汽车底盘零件等
RuT300	300	240	1.5	140~217	排气管、变速箱体、汽缸盖、液压件、纺织机零件、钢锭模等
RuT340	340	270	1.0	170~249	重型机床件大型齿轮箱体、盖、座、飞轮、起重机卷筒等
RuT380	380	300	0.75	193~274	活塞环、汽缸套、制动盘、钢珠研磨盘、吸淤泵体等
RuT420	420	335	0.75	200~280	

4. 蠕墨铸铁的热处理

对蠕墨铸铁热处理的目的是调整基体组织,以获得不同的力学性能要求。常用的热处理方式有正火和退火。

(1) 正火。普通蠕墨铸铁在铸态时基体中含有大量的铁素体,通过正火可以增加珠光体

量,以提高强度和抗磨性。常用的正火工艺有全奥氏体化正火和两阶段低碳奥氏体正火。全奥氏体化正火是将零件加热至 $880\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后风冷接近自然温度,再继续加热至 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后风冷。两阶段低碳奥氏体正火是将零件加热至 $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,随炉冷却至 $820\sim 860\text{ }^{\circ}\text{C}$,然后风冷至自然温度时,再加热至 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后风冷。两阶段低碳奥氏体正火后,在塑性、强度方面较全奥氏体化正火高。

(2)退火。对蠕墨铸铁退火是为了获得 85% 以上的铁素体或消除薄壁外面的游离渗碳体。退火工艺是当渗碳体较多时加热到 $900\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后随炉冷却,当渗碳体较少时加热到 $(800\pm 10)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后随炉冷却。

2.5.6 合金铸铁

在铸铁中加入一定量的合金元素,可以使铸铁具有某些特殊性能,如耐磨性、耐腐蚀性、耐热性等,这类铸铁就称为合金铸铁。常见的合金铸铁包括以下几种:

1. 耐磨合金铸铁

耐磨铸铁主要用于制造摩擦条件下工作的机械零件。一类是在有润滑条件下工作的耐磨铸铁(又称减磨铸铁),如机床导轨、汽缸套及轴承等;另一类则是在干摩擦条件下工作的耐磨铸铁(又称抗磨铸铁),如轧辊、犁铧、球磨机衬板和磨球等。

1) 减磨铸铁

减磨铸铁应有较低的摩擦系数和能够很好地保持连续油膜的能力。最适宜的组织形式应是在软的基体上分布有坚硬的强化相。细层状珠光体灰铸铁就能满足这一要求,其中铁素体为软基体,渗碳体为强化相,同时石墨也起着贮油和润滑的作用。

常用的减磨铸铁有高磷铸铁,通过提高磷的含量,可形成高硬度的磷化物共晶,呈网状分布在珠光体基体上,形成坚硬的骨架,使铸铁的耐磨损能力比普通灰铸铁提高一倍以上。在含磷较高的铸铁中再加入适量的 Cr、Mo、Cu 等元素,则耐磨性能更好。

2) 抗磨铸铁

抗磨铸铁在干摩擦及磨粒磨损条件下工作。这类铸铁不仅受到严重的磨损,而且承受很大的载荷,获得高而均匀的硬度是提高这类铸铁耐磨性的关键。

抗磨铸铁的组织应具有均匀的高硬度。普通白口铸铁就是一种抗磨性高的铸铁,但其脆性大,不宜作承受冲击的零件,在有冲击的场合可使用冷硬铸铁;含有少量的 Cr、Mo、W、Mn、Ni、B 等合金元素的低合金白口铸铁具有一定的韧性,用于低冲击载荷条件下的抗磨零件,如砂浆泵件、农产品加工设备中的易磨损件等;在中、低冲击载荷的高应力碾研磨损条件下,高铬白口铸铁代替高锰钢已显示了优越的抗磨性能;中锰球墨铸铁具有很好的耐磨性、较高的强度和韧性,适用于犁铧、饲料粉碎机锤片、衬板、粉碎机锤头等。

2. 耐热合金铸铁

铸铁耐热性是指在高温下铸铁抵抗“氧化”和“生长”的能力。氧化是铸铁在高温下与周围气体接触使表层发生化学腐蚀的现象。生长是铸铁在反复加热和冷却时产生的不可逆的体积长大现象。铸铁生长的原因是由于氧化性气体沿石墨片边界或裂纹渗入铸铁内造成氧化,以及因 Fe_3C 分解而发生的石墨化引起铸铁体积膨胀。

提高铸铁耐热性可以采取以下几方面措施：

1) 合金化

在铸铁中加入硅、铝、铬等合金元素进行合金化,可使铸铁表面形成一层致密的、稳定性很高的氧化膜,阻止氧化气体渗入铸铁内部产生内部氧化,从而抑制铸铁的生长。通过合金化以获得单相铁素体或奥氏体基体,使其在工作温度范围内不发生相变,从而减少因相变而引起的铸铁生长和微裂纹。

2) 球化处理或变质处理

经过球化处理或变质处理,使石墨转变成球状和蠕虫状,提高铸铁金属基体的连续性,减少氧化气体渗入铸铁内部的可能性,从而有利于防止铸铁内部的氧化和生长。

常用耐热铸铁包括中硅耐热铸铁、中硅球墨铸铁、高铝耐热铸铁、高铝球墨铸铁、低铬耐热铸铁和高铬耐热铸铁等。

3. 耐蚀合金铸铁

铸铁在周围环境介质的作用下发生化学或电化学破坏称为腐蚀。这些介质包括各种酸、碱、盐和水等。铸件的腐蚀可以是均匀的,也可以是局部的或晶间的,其中以晶间腐蚀的危害性最大。

提高铸铁耐蚀性的主要途径是合金化。在铸铁中加入硅、铝、铬等合金元素,能在铸铁表面形成一层连续致密的保护膜,可有效地提高铸铁的抗腐蚀性。在铸铁中加入铬、硅、钼、铜、镍、磷等合金元素,可提高铁素体的电极电位,以提高抗腐蚀性。另外,通过合金化还可以获得单相金属基体组织,减少铸铁中的微电池,从而提高其抗腐蚀性。

耐蚀铸铁广泛应用于石油化工、造船等工业中,用来制造经常在大气、海水及酸、碱、盐等介质中工作的管道、阀门、泵类、容器等零件。但各类耐蚀铸铁都有一定的适用范围,必须根据腐蚀介质、工作条件合理选用。

2.6 粉末冶金

粉末冶金材料是将金属粉末或合金粉末混合压制成型,然后对制品进行烧结及后处理而获得的材料。制造粉末冶金材料的工艺过程不用熔炼和铸造,从粉末到制成材料或零件的过程,工序较简单。粉末冶金法是一种少切削或无切削的加工工艺,用这种方法不但可以制成具有某些特殊性能的制品,而且节省材料,节省加工工时和减少机械加工设备,尤其制造大批量的零件时,可大大提高生产效率,降低成本。近年来,粉末冶金工业得到了迅速的发展,目前,各种粉末冶金制件在机械、交通等各部门已获得广泛应用,尤其在汽车、拖拉机工业中应用最多。

2.6.1 粉末冶金的生产工艺过程

粉末冶金工艺过程包括粉料制备、压制成型、烧结及后处理等几个工序。

1) 粉料制备

粉料制备包括粉末材料的制取及粉料混合等步骤。粉末的制取就是使块状金属、合金或金属化合物由固态、液态或气态转变成粉末状态。制粉方法有机械法和物理化学法

两种,机械法是将原材料进行机械粉碎,其化学成分基本上不发生变化而获得粉末的工艺过程;物理化学法是借助化学或物理的作用,改变原料的化学成分或聚集状态而获得粉末的工艺过程。

混合是粉末压制成型前最重要的辅助工序之一,其目的是改善混合料的压制性能,因为烧结制品的性能主要取决于物料混合后各组元分布的均匀程度。

2) 压制成型

压制成型是粉末冶金工艺中极重要的工序,其目的是将混合均匀的松散粉末加工成具有一定形状和尺寸以及一定密度和强度的坯块。为了改善粉末的成型性和可塑性,可往粉料中加入一定量的汽油橡胶溶液或石蜡等增塑剂。

3) 烧结

制件模压制成型后便可置于具有保护气体的烧结炉内进行高温加热烧结。粉末冶金制品的烧结与金属材料的熔炼有所不同,熔炼时材料的全部组元都转变成液相,而烧结时,至少有一种组元处于固相状态。以烧结法制得的材料,可按烧结过程中的形态不同而分为两类。一种是烧结时不形成液相的,如合金钢、耐熔化合物、青铜-石墨材料等;另一种是烧结时部分形成液相的,如硬质合金、金属陶瓷等。烧结需在通有保护气体(煤气、氢等)的高温炉或真空炉中进行。

4) 后处理

后处理是指经过烧结后,使粉末压制的坯件获得所需各种性能的过程。有些制件烧结好后即可使用,但有些制件还需再进行必要的后处理。后处理包括精压、热处理、浸渍及熔渗等多种工艺方法。当制件经过烧结成坯件后,如制件所要求的形状或尺寸在初压时不易得到,则有必要在烧结后再次加压,即进行所谓的“精压处理”,齿轮、球面轴承、钨钼管材等烧结制件,常通过冷挤压方法来进行后处理,以提高制品的密度,改善表面粗糙度及尺寸精度。又如,为了改善烧结制件的力学性能,对制件进行淬火或表面淬火也是后处理方法的一种,还有轴承和其他许多粉末冶金制件,为了达到润滑或耐蚀的目的而进行浸油或浸渍其他液态润滑剂,这种后处理方法称为浸渍处理。另外,还有一种后处理方法称为熔渗,即将烧结制件置于熔融的低熔点金属或合金中,使金属或合金渗入多孔烧结制件的孔隙中去,其目的是增加制件的密度、强度、硬度、塑性或韧性等性能。

2.6.2 粉末冶金工艺特点

粉末冶金在技术和经济上具有以下特点:

- (1)可制造其他金属成型工艺不能制造的、形状复杂或奇特的零件。
- (2)用粉末冶金生产制造零件,金属材料的损耗小,材料利用率可高达97%。
- (3)可制取高纯度的材料,因为在生产过程中不会给材料带来污垢,而且零件表面光洁度较好。
- (4)粉末冶金工艺本身不复杂,因此,对操作工人的技能等级要求不高,适用于中等至大批量零件生产。

粉末冶金法的缺点是只能生产尺寸有限的制品,这是由粉末成型的特点决定的。用粉末压制方法生产的机械零件还存有残余空隙,因而不可能得到用铸造法或锻造法生产的制品所具有的机械性能,但这些问题在多数情况下是可以通过其他方法解决的。

2.6.3 常用粉末冶金材料

1. 硬质合金

硬质合金是将特制的高熔点、高硬度的金属碳化物粉末和粘结剂混合,压制成型,再经烧结而成的一种粉末冶金材料。这种材料的硬度高,常温下最高硬度可达 69~81 HRC,热硬性好;耐磨性好,用作刀具时,其切削速度是高速钢的 4~7 倍;机械强度高,常温下抗压强度高达 5 886 MPa,900 °C 时抗弯强度仍可达 980 MPa;耐腐蚀性和抗氧化性好,具有良好的耐酸、耐碱性能。

硬质合金的种类很多,目前常用的有金属陶瓷硬质合金和钢结硬质合金。

1) 金属陶瓷硬质合金

金属陶瓷硬质合金是将难熔的金属碳化物粉末(如 WC、TiC、TaC)和粘结剂(Co、Ni、Mo)混合,加压成型,再经烧结而成的粉末冶金材料。

在金属陶瓷硬质合金中,碳化物是合金的“骨架”,坚硬耐磨,钴、镍等起粘结作用,它们之间的相对量将直接影响合金的性能。一般说来,粘结剂含量越高(碳化物含量越低),则强度、韧性越好,而硬度及耐磨性越低。因此,粘结剂含量较多的金属陶瓷硬质合金一般宜制造用于粗加工或加工表面比较粗糙的工件的刀具,以及受冲击作用力较大的冷冲、冷锻等模具。

金属陶瓷硬质合金广泛应用的有钨钴类、钨钛钴类、通用合金类及碳化钛基类等几种类型。含钴量较高的 YG15、YG20 等具有较高的强度及韧性,而其余钨钛钴等几种类型如 YT30、YW1 等,则具有较高的硬度、较好的耐磨性及热硬性。

金属陶瓷硬质合金由于硬度太高、太脆,很难进行切削加工,因而经常制成一定规格的刀粒或刀片镶焊在刀体上使用。一般根据加工方式、被加工材料的性质及加工条件来选用硬质合金刀片。

2) 钢结硬质合金

钢结硬质合金是性能介于陶瓷硬质合金和工模具钢之间的一种新型工模具材料,其硬质相也是难熔的金属碳化物,如 WC、TiC 等,但粘结相则是合金钢、高速钢、不锈钢、高锰钢等钢基体。硬质相赋予材料高硬度和高耐磨的性能,而钢基体则赋予材料可加工性和可热处理性,也是以粉末冶金方法生产,经球化退火后方可使用。

钢结硬质合金烧结坯件经退火后可进行一般的切削加工,也可进行焊接和锻造。加工成型后经淬火、回火,有相当于金属陶瓷硬质合金材料的高硬度及良好的耐磨性,并有较好的韧性及耐热、耐腐蚀、抗软化等特性。

钢结硬质合金可用于制造各种复杂的刀具,也可用于制造在较高温度下工作的模具和耐磨零件。

2. 粉末冶金减磨材料

粉末冶金减磨材料是指用粉末冶金方法制造的、在相对运动中相互摩擦且表面之间的摩擦系数较小的金属、合金或金属复合材料。粉末冶金减磨材料广泛用于制造滑动轴承、止推轴承、端面密封、支承衬套等,其主要优点是在有限润滑油的条件下,使用寿命较长和可靠性较高。粉末冶金减磨材料按其制造方法可分为两类。一类在材料孔隙中浸有润滑油或在材料成分中加有减磨剂或固体润滑剂(石墨、氧化物、硫化物、氮化物、氟塑料或其他塑料)。

这类材料在干摩擦条件下依靠自身或表层含有的润滑剂润滑,即具有自润滑效果。另一类是钢与烧结合金的复合材料,如在钢带上烧结一层铜铅合金粉末等。这类材料的承载能力比前一类大,一般用以制造重载轴承。

本章小结

材料的性能取决于材料的化学成分及其内部的组织结构,不同成分和不同状态下的性能差异也非常大。造成金属材料性能差异的主要原因是由于金属材料内部结构的不同。本章主要讲解了晶格和晶胞的概念、常见晶格类型、金属的实际晶体结构、金属的结晶和金属的同素异构转变等内容。主要讲解了金属材料的内部特征,对于正确理解材料的性能差异和合理选材非常有益。

碳素钢是指含碳量小于 1.3%,并含有少量的硫(S)、磷(P)、硅(Si)、锰(Mn)等杂质元素的铁碳合金。主要讲解了碳及其常存杂质对碳素钢性能的影响,碳素钢的分类,常用碳素钢的性能、牌号及用途。

钢的热处理是将钢在固态下进行加热、保温和冷却,以获得所需要的组织结构与性能的工艺过程。主要介绍了退火、正火、淬火和回火的工艺过程和用途。

铸铁是含碳量大于 2.11%的铁碳合金。应了解铸铁的石墨化,常见几种铸铁中碳的存在形式,各种铸铁的性能、用途和牌号等。

粉末冶金材料是将金属粉末(或和非金属粉末的混合物)混合、压制成型,然后对制品进行烧结及后处理而获得的材料。它也是一种少切削、无切削的加工工艺,用它可以制成具有某些特殊性能的制品,同时可节省材料和加工工时,减少机械加工设备,尤其在制造大批量的零件时,可大大提高生产效率,降低成本。

习 题 2

2-1 晶体与非晶体的主要区别是什么?

2-2 什么叫过冷度?影响过冷度的主要因素是什么?

2-3 晶粒大小对材料的力学性能有何影响?如何细化晶粒?

2-4 何谓铁素体、奥氏体、渗碳体、珠光体和莱氏体?它们在结构、组织形态和性能上有什么不同?

2-5 画出铁碳合金相图,填出各相区的组织;并分析含碳量分别为 0.6%、1.2%、4.3%的铁碳合金的结晶过程。

2-6 现有形状、尺寸完全相同的四块铁碳合金,其含碳量分别为 0.2%、0.4%、1.2%和 3.5%,根据所学的知识,可用哪些方法来区别它们?

2-7 根据 Fe-Fe₃C 相图,说明产生下列现象的原因:

(1)在 1 100 °C,含碳 0.4%的碳钢能进行锻造,含碳 4.0%的铸铁不能锻造。