

第一章 金属的晶体结构

第一节 金属的晶体结构

从历年考题来看,本节常见题型以名词解释、选择、判断、填空、计算与绘图等考题为主,其中名词解释、选择、判断、填空题以小分值考题为主,计算与作图题的分值较大。希望考生能注意零散的知识。

※本章复习要点

1. 区别晶体结构与空间点阵。
2. 掌握标定立方晶系和六方晶系晶面和晶向的方法。
3. 熟悉体心立方结构、面心立方结构和密排六方结构的特征、原子堆垛方式和晶体中的间隙。
4. 了解晶体的多晶型性特性及其对金属性能的影响。

※本节重要考点

1. 重点掌握:立方晶系(米勒指数)晶面和晶向的标定方法;
2. 掌握:六方晶系(四指数)晶面和晶向的标定方法。
3. 理解:晶体结构与空间点阵。

※本节重要概念

晶体结构,空间点阵,晶格,晶胞

※考点精讲

1. 晶体的特性

(1) 晶体是内部质点(原子、离子、分子)在三维空间呈周期性重复排列的固体。

(2) (单)晶体性能:具有固定的熔点;各向异性

(3) 多晶体一般显示出各向同性,即伪各向同性。

非晶体:原子在三维空间的不规则排列或长程无序。各向同性,无固定的熔点。但在一定条件下可以转变晶体。

2. 晶体结构与空间点阵

(1) 晶体结构——晶体中原子、离子或原子团在三维空间有规律的周期性的实际排列。

特点:很多种;可能存在局部缺陷。

(2) 空间点阵——将构成晶体的原子、离子或原子团抽象为几何点(称之为阵点),由几何点做周期性的规则排列所形成的三维阵列。所有阵点的周围环境相同。

特点:有 14 种,点的理想排列。

3. 晶格与晶胞

(1) 晶格: 用一系列平行直线将阵点连接起来, 形成的三维空间格架。它的实质仍是空间点阵。

(2) 晶胞: 从晶格中选取的、能够完全反映晶格特征的最小几何单元。通常为平行六面体。

晶胞形状和大小: 由三个棱边的长度 a, b, c 及其夹角 α, β, γ 表示。将 a, b, c 称之为晶格常数。

4. 7 大晶系和 14 中空间点阵

三斜晶系: $a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ 简单三斜点阵

单斜晶系: $a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$ 简单单斜点阵, 底心单斜点阵

正交晶系: $a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 简单正交点阵, 底心正交点阵, 体心正交点阵, 面心正交点阵

六方晶系: $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ 简单六方点阵

菱方晶系: $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ 简单菱方点阵

正方晶系: $a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 简单正方点阵, 体心正方点阵

立方晶系: $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 简单立方点阵, 体心立方点阵, 面心立方点阵

5. 典型的金属晶体结构

(1) 体心立方结构

1) 晶胞: 晶胞的 8 个角上各有 1 个原子, 构成立方体, 在立方体的中心还有 1 个原子。晶胞的原子数为 2

2) 点阵常数: $a = \frac{4\sqrt{3}}{3}R$

3) 配位数: 8

4) 致密度: $K = \frac{2 \times \frac{4}{3}\pi R^3}{\left(\frac{4R}{\sqrt{3}}\right)^3} \approx 0.68$

(2) 面心立方结构

1) 晶胞: 在晶胞的 8 个角上各有 1 个原子, 构成立方体, 在立方体 6 个面的中心各有 1 个原子。晶胞原子数为 4

2) 点阵常数: $a = 2\sqrt{2}R$

3) 配位数: 12

4) 致密度: $K = \frac{nV_1}{V} = \frac{4 \times \frac{4}{3}\pi R^3}{\left(\frac{4R}{\sqrt{2}}\right)^3} \approx 0.74$

(3) 密排六方结构

1) 晶胞: 在晶胞的 12 个角上各有 1 个原子, 构成六方柱体, 上低面与下底面的中心各有 1 个原子, 晶胞内还有 3 个原子。每个晶胞中的原子数为 6

2) 点阵常数: $a = 2R, c/a \approx 1.633$

3) 配位数: 12

$$4) \text{致密度: } K = \frac{nV_1}{V} = \frac{4 \times \frac{4}{3}\pi R^3}{\left(\frac{4R}{\sqrt{2}}\right)^3} \approx 0.74$$

6. 立方晶体的理论密度的计算

已知某金属晶体的原子半径, 求该晶体的密度?

$$\rho = \frac{\text{一个晶胞的质量}}{\text{一个晶胞的体积}} = \frac{\text{原子数} \times (1 \text{ 摩尔质量} / (6.02 \times 10^{23}))}{a^3}$$

面心立方晶体的金属: γ -Fe, Cu, Al, Ni 等; 体心立方晶体的金属: α -Fe, V, W, Cr 等

7. 晶体中的原子堆垛方式

对面心立方结构: 堆垛面为 (111); 堆垛方向为 $[111]$; 堆垛次序为 ABCABCABC...

对密排六方结构: 堆垛面为 (0001); 堆垛方向为 $[0001]$; 堆垛次序为 ABABAB...

对体心立方结构: 堆垛面为 (110); 堆垛方向为 $[110]$; 堆垛次序为 ABABAB...

8. 晶体中的间隙

晶体中的间隙有四面体间隙和八面体间隙两种。间隙中所能容纳的最大圆球半径称为间隙半径, 其大小为间隙中心至点阵结点中心的距离。

(1) 体心立方结构中的间隙

1) 八面体间隙

位置: 面、棱的中心

数量: 6 个/晶胞

大小: $r/R = 0.15$

2) 四面体间隙

位置: 立方体的下底面坐标 $(1/2, 1/4, 0), (1/2, 3/4, 0), (1/4, 1/2, 0), (3/4, 1/2, 0)$; 立方体的上底面坐标 $(1/2, 1/4, 1), (1/2, 3/4, 1), (1/4, 1/2, 1), (3/4, 1/2, 1)$ 。其他四个面的坐标类似

数量: 12 个/晶胞

大小: $r/R = 0.29$

(2) 面心立方结构中的间隙

1) 八面体间隙

位置: 体心、棱的中心

数量: 4 个/晶胞

大小: $r/R = 0.414$

2) 四面体间隙

位置:体对角线的 $1/4$ 处(靠近顶点),或用三组相互垂直的面将晶胞分成八个小立方体,每个小立方体的体心

数量:8 个/晶胞

大小: $r/R = 0.225$

(3) 密排六方结构中的间隙

1) 八面体间隙

位置:坐标 $(1/3, -1/3, 1/4)$ 等

数量:6 个/晶胞

大小: $r/R = 0.414$

2) 四面体间隙

位置:棱上, c 轴上, 体内

数量:12 个/晶胞

大小: $r/R = 0.225$

9. 晶向指数

晶体中原子列的方向叫做晶向,表征晶向方位的标记称为晶向指数。

(1) 用坐标法确定晶向指数的步骤

1) 建立右手坐标系,将坐标原点设在待测晶向上,三条棱边为坐标轴 x, y, z ,以晶胞棱边的长度作为坐标轴的单位长度 a, b, c 。

2) 在待测晶向上找到另一点(一般离原点最近一个阵点),并求出该点以晶格常数为单位的坐标值。

3) 将坐标值按比例化为最小整数,放在一个方括号中,就得到该晶向的晶向指数 $[uvw]$

(2) 讨论

- 晶向指数 $[uvw]$ 不是指一个晶向,而是代表一组相互平行的晶向
- 平行晶向的晶向指数相同,或数字相同而正负号相反,如 $[111]$ 与 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 。
- 原子排列相同但空间位向不同的所有晶向称为晶向族,以 $\langle uvw \rangle$ 表示。在立方晶系中, $\langle 100 \rangle$ 包括 $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 以及方向与之相反的 $[\bar{1}00]$ 、 $[0\bar{1}0]$ 、 $[00\bar{1}]$ 等 6 个晶向。

(3) 立方晶系中的一些重要晶向

$\langle 100 \rangle$: 轴向

$\langle 110 \rangle$: 面对角线

$\langle 111 \rangle$: 体对角线

$\langle 112 \rangle$: 顶点到其相对的面心方向

10. 晶面指数

晶体中的原子层面叫做晶面。表征晶面方位的标记称为晶面指数。

(1) 晶面指数的标注方法:

1) 建立右手坐标系, 确定原点 (非晶面内阵点), 以三条棱边为坐标轴 x, y, z , 并以晶胞棱边的长度作为坐标轴的单位长度 a, b, c 。

2) 以晶格常数为单位求出晶面在三个坐标轴上的截距。

3) 取截距的倒数

4) 将它们化为最小整数, 放入加圆括号中, 即得到该晶面的晶面指数 (hkl) 。

(2) 讨论

1) 如果晶面平行于哪个轴, 则相应的那个指数为 0。

2) 晶面指数 (hkl) 不是指一个晶面, 而是代表一组相互平行的晶面。

3) 平行晶面的晶面指数相同, 或数字相同而正负号相反, 如 (100) 与 $(\bar{1}00)$ 平行。

4) 同一种晶体结构中, 原子排列情况相同而空间位向不同的所有晶面称为晶面族, 以 $\{hkl\}$ 表示。

5) 在立方晶系中, $\{111\}$ 包括 $(111), (\bar{1}11), (1\bar{1}1), (11\bar{1})$ 。

(3) 立方晶系中的晶向指数和晶面指数

1) 在立方晶系中, 当一晶向 $[uvw]$ 位于或平行于某一晶面 (hkl) 时, 则满足以下关系: $hu + kv + lw = 0$;

2) 在立方晶系中, 当一晶向 $[uvw]$ 与某一晶面 (hkl) 垂直时, 则晶向指数与晶面指数完全相等, 即 $h = u, k = v, l = w$ 。例如, $[100] \perp (100), [111] \perp (\bar{1}\bar{1}\bar{1}), [110] \perp (110)$ 。

11. 六方晶系的晶向指数和晶面指数

以上介绍的用三个指数表示晶向和晶面, 原则上适用于任意晶系。即以 X_1, X_2, Z 为三个坐标轴, X_1 轴与 X_2 轴夹角为 120° , Z 轴与 X_1, X_2 轴垂直。但用三坐标系标注六方晶系的晶向和晶面有一个很大的缺点: 晶体中等价的晶向和晶面不具有类似的指数。从右图可以看出, 密排方向 D_1 和 D_2 是晶体学的等价方向, 但其晶向指数却分别是 $[100]$ 和 $[110]$ 。晶胞的六个柱面是晶体学的等价晶面, 但其晶面指数却分别是 (100) 和 $(1\bar{1}0)$ 。这给晶体研究带来不便。

(1) 四轴坐标系标定六方晶系晶向的方法

比较方便容易的方法步骤是:

1) 用三轴坐标系求出晶向指数 $[U V W]$

2) 根据以下关系进行换算

$$u = 2/3U - 1/3V$$

$$v = 2/3V - 1/3U$$

$$t = -(u + v)$$

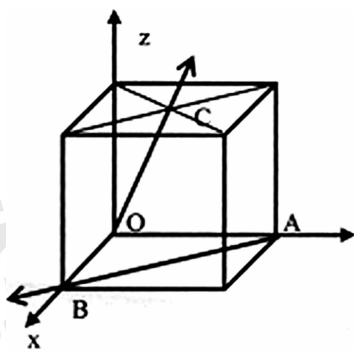
$$w = W$$

3) 将 u, v, t, w 放入方括号内, 得到 $[uvtw]$ 。

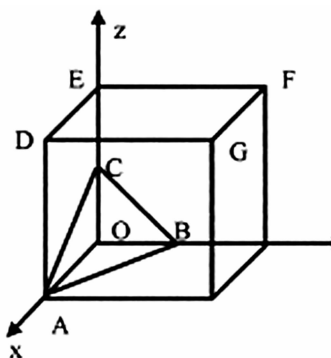
(2) 四轴坐标系标定六方晶系晶面的方法:

选择 X_1, X_2, X_3 及 Z 轴四个坐标轴, 其中 X_1, X_2, X_3 三个坐标轴位于同一底面上并互成 120° , 轴

3. _____称为致密度,BCC、FCC、HCP 的致密度分别为_____. (2011 年华南理工大学)
4. 面心立方晶体结构的原子半径为_____,原子数为_____,配位数为_____,致密度为_____. (2012 年华南理工大学)
5. 纯铜单晶体中,密排面为_____,密排方向为_____,滑移系数目为_____. (2011 年河北工业大学)
6. 下图为一立方晶胞,O、A、B 为顶点,C 为上平面中心点,AB 的晶向指数为_____,OC 的晶向指数为_____.
7. 布拉菲点阵共有_____种,归纳为_____个晶系;面心立方结构单个晶胞中的原子数为_____,密排六方结构单个晶胞中的原子数为_____. (2007 年青岛科技大学)
8. 下图为一立方晶胞,B、C 棱边中点,A、D、E、F、G 为顶点,ABC 的晶面指数为_____,DEFG 的晶面指数为_____.



第 6 题图



第 8 题图

第二节 实际金属的晶体结构

本节的复习思路应以认识“晶体缺陷”在材料科学中的重要意义。

本节常见题型仍以名词解释、选择、填空等小分值考题为主,即使出现分值稍大的题型,也莫过于简答题。

※本章复习要点

1. 认识“晶体缺陷”在材料科学中的重要意义。
2. 掌握点缺陷的种类,形成以及对材料性能及扩散的影响。
3. 熟悉位错的基本类型和柏氏矢量的物理意义。
4. 掌握晶界的结构特点及其对晶体性能的影响。

※本章复习要点

1. 重点掌握:位错的结构特点。
2. 掌握:点缺陷和晶界的结构特点。
3. 深刻理解:晶界的类别、结构及其对材料行为的影响。

※本节重要概念

平衡空位浓度, 柏氏矢量, 晶界能

※考点精讲

1. 点缺陷

(1) 点缺陷的类型

1) 肖托基空位: 原子从平衡位置迁移至晶体的表面所形成的空位。

2) 弗兰克尔空位: 原子迁移至晶格的间隙中所形成的空位

3) 其它空位: 原子迁移至晶格其它空位处所形成的空位. 没有产生新的空位, 但可使空位交换位置。

4) 间隙原子: 位于晶体点阵间隙的原子。

5) 置换原子: 位于晶体点阵阵点的异类原子。

(2) 点缺陷的平衡浓度: 点缺陷是一种热力学平衡缺陷, 即在一定温度下, 点缺陷有一定的平衡浓度. 温度升高. 点缺陷浓度提高。

(3) 点缺陷的产生及运动

1) 点缺陷的产生

平衡点缺陷: 原子热振动中的能量起伏;

过饱和缺陷: 外来作用, 如高温淬火, 辐射、冷加工。

2) 点缺陷的运动 点缺陷的迁移、复合导致其浓度降低; 点缺陷聚集导致其浓度升高或塌陷。

(4) 点缺陷对金属的影响

1) 结构变化 晶格畸变。如空位引起晶格收缩, 间隙原子引起晶格膨胀, 置换原子引起晶格收缩或膨胀。

2) 性能变化 物理性能: 电阻增大、体积膨胀、密度减小。力学性能: 屈服强度升高。

3) 加速金属中的扩散过程 因而凡是与扩散有关的相变、化学热处理、高温下的塑性变形和断裂等, 都与空位和间隙原子的存在和运动有着密切的关系。

2. 线缺陷——各种类型的位错

(1) 位错的概念、意义与类型;

1) 概念: 晶体中某处一系列或若干列原子有规律的错排。

2) 意义: 对材料的力学行为(如塑性变形、强度、断裂)起到决定性的作用, 对材料的扩散、相变过程有较大影响

3) 位错类型: 刃型位错、螺型位错、混合型位错。其中位错线、晶体滑移方向、位错运动方向具有确定的关系

(2) 刃型位错的特征:

①刃型位错有一个多余的半原子面。

②刃型位错线是一个具有一定宽度的细长晶格畸变管道,其中既有正应变,也有切应变。对于正刃型位错,滑移面之上晶格受到压应力,滑移面之下为拉应力。

③位错线与晶体的滑移方向相垂直,位错线运动方向与位错线垂直。

(3)螺型位错的特征

①螺型位错没有额外半原子面。

②螺型位错线是一个具有一定宽度的细长晶格畸变管道,只有切应变,位错线周围的弹性应力场呈轴对称分布

③位错线与晶体的滑移方向平行,位错线运动方向与位错线垂直。

(4)位错的性质

位错的实际形状不是一条直线,位错及其畸变区是一条管道。位错是晶体已滑移区和未滑移区的边界,因而不能中断于晶体内部。但可在表面露头,或终止于晶界和相界,或与其他位错相交,或自行封闭成环。

(5)柏氏矢量

1)确定方法:

①在位错周围沿着点阵结点形成封闭回路;

②在理想晶体中按同样顺序作同样大小的回路;

③在理想晶体中从终点到起点的矢量即为柏氏矢量。

2)物理意义与应用:

①代表位错,并表示其特征(强度、畸变量);

②表示位错引起的晶体滑移的方向和大小;

③一条位错线具有唯一的柏氏矢量;

④判断位错类型,如位错线与柏氏矢量垂直,则是刃型位错;若位错线与柏氏矢量平行,则是螺型位错。

3)表示方法:

柏氏矢量的方向可用晶向指数表示,柏氏矢量的大小称为位错强度,可用其模表示,它表示了该晶向上原子间的距离。立方晶系中的柏氏矢量可记为: $b = \frac{a}{n} [uvw]$

该柏氏矢量的模为: $b = \frac{a}{n} \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$

例如,面心立方晶体中常见的位错的柏氏矢量为: $b = \frac{a}{2} [110]$

(6)位错的运动——滑移和攀移两种形式

1)滑移

① 作用于单位长度位错上的力为: $F = \tau b$, 方向垂直于位错线,并且指向未滑移区。

② 位错滑移的规律和特点

位错滑移规律:

当刃型位错线沿滑移面滑过整个晶体时,就会在晶体的表面沿柏氏矢量方向产生一个滑移的台阶,其宽度等于柏氏矢量 b 。在滑移时,刃型位错的方向垂直于位错线而与柏氏矢量平行。刃型位错的滑移面是由位错线与柏氏矢量所构成的平面,故滑移面确定。

当螺型位错线沿滑移面滑过整个晶体时,同样就会在晶体的表面沿柏氏矢量方向产生一个宽度等于柏氏矢量 b 的滑移台阶。在滑移时,螺型位错的方向与位错线垂直,也与柏氏矢量垂直。由于螺型位错线与柏氏矢量平行,故滑移面不确定。

位错滑移运动的特点:位错运动时,只有位错中心附近少数原子的发生微量弹性位移,其它大多数原子仍处于平衡位置。

2) 攀移——在高温下原子的扩散或外加应力的作用下,刃型位错的半原子面扩大或缩小,导致位错线在垂直于滑移面的法线方向的运动。通常将多余半原子面向上移动称为正攀移,向下运动称为负攀移。

攀移的特点:

① 扩散需要热激活,受温度影响大,比滑移需要更高的能量。

② 纯剪应力不能引起体积变化,对攀移不起作用。

③ 过饱和空位的存在有利于攀移进行。

(7) 位错密度

1) 定义:通常把单位体积中所包含的位错线的总长度称为位错密度。或穿过单位截面积的位错线数目。

2) 研究方法:

① 浸蚀法;

② TEM 观察法;

③ X 射线衍射法。

3) 位错密度与晶体强度的关系

当位错密度较低时,晶体的强度 τ_c 随着位错密度 ρ 的增加而减小;当位错密度较高时,晶体的强度 τ_c 随着位错密度 ρ 的增加而增大。

3. 面缺陷——各种界面

(1) 表面

1) 概念:金属与真空或气体、液体等外部介质相接触的界面

2) 表面能:由于在表面层产生了晶格畸变,所以其能量就要升高,将这种单位面积上升高的能量称为比表面能,简称表面能。表面能与外部介质、裸露晶面及表面的曲率等有关。

3) 表面吸附:外来原子或气体分子在表面上富集的现象。包括物理吸附和化学吸附。

(2) 晶界

1) 概念:晶体结构相同但取向不同的晶粒之间的界面。简称晶界。通常将产生单位面积晶界所需要的能量,或单位面积晶界高出其晶体内部的能量称为晶界能。

2) 分类:

①小角度晶界:相邻晶粒的位向差小于 10° 的晶界。其结构为位错列,又分为对称倾侧晶界和扭转晶界。

②大角度晶界:相邻晶粒的位向差大于 10° 的晶界。其结构为几个原子范围内的原子的混乱排列,可视为一个过渡区。

③亚晶界:位相差小于 1° 的亚晶粒之间的边界。为位错结构(多变化)

④孪晶界:两块相邻孪晶的共晶面。分为共格孪晶界和非共格孪晶界。

⑤堆垛层错:在实际晶体中,晶面堆垛顺序发生局部差错而产生的一种晶体缺陷称为堆垛层错,简称层错。

(3) 相界

1) 概念:具有不同晶体结构的两相之间的分界面称为相界

2) 分类:共格界面、半共格界面和非共格界面。非共格界面的晶界能最高,半共格界面的晶界能次之,共格界面的晶界能最低。

(4) 晶界的特性

1) 界面能会引起界面吸附。

2) 界面上原子扩散速度较快。

3) 对位错运动有阻碍作用。

4) 易被氧化和腐蚀。

5) 原子的混乱排列有利于固态相变的形核。

本节名校真题

一、名词解释:

位错。(2010 年河北工业大学)

二、判断题:

1. 晶界处原子处于不稳定状态,故其腐蚀速度一般都比晶内快。(2007 年青岛科技大学)

2. 螺型位错和刃型位错都可以进行交滑移。(2007 年青岛科技大学)

三、选择题:

3. 一根弯曲的位错线,_____。(2012 年华南理工大学)

A. 具有唯一的位错类型

B. 具有唯一的柏氏矢量

C. 位错类型和柏氏矢量都不同。

四、填空题：

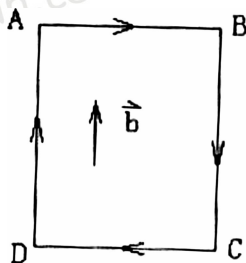
1. 柏氏矢量 $b = a/2[10-1]$, 该柏氏矢量大小为_____。(2011 年河北工业大学)
2. 在实际晶体中, 晶面堆垛顺序发生局部差错而产生的一种晶体缺陷称为_____。(2012 年华南理工大学)
3. 单晶体 $\alpha - \text{Fe}$ 的原子密排面的堆垛方式为_____, 单晶 $\gamma - \text{Fe}$ 的原子密排面的堆垛方式为_____, 单晶 Mg 的原子密排面的堆垛方式为_____。(2012 年青岛科技大学)
4. 对于金属晶体来说, 常见的点缺陷有三种, 即空位、_____和_____。(2011 年河北工业大学)
5. 刃型位错的柏氏矢量与位错线相互_____; 螺型位错的柏氏矢量与位错线相互_____。(2007 年青岛科技大学)
6. 相界面结构有三类, 它们是_____界面、_____界面和_____界面, 其中_____界面能最低。(2011 年华南理工大学)
7. 可以把位错理解为晶体中_____区和_____区的边界。正刃型位错所在华裔面之上晶格受_____应力, 之下受_____应力。
8. 位错引起的晶格畸变大小可用_____表示。(2010 年华南理工大学)
9. 位错的滑移面是_____和_____所构成的晶面。刃型位错的滑移面有_____个, 刃型位错的滑移面有_____个。(2010 年华南理工大学)

五、简答题

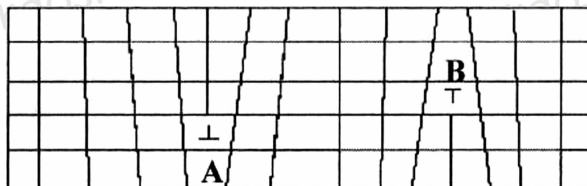
1. 简述金属晶体中缺陷的类型。(2011 年河北工业大学)
2. 如图所示一位错环, 该位错环各部分能否都是螺型位错或各部分都是刃型位错, 为什么? 指出个部分位错的性质。(2010 年青岛科技大学)

六、请分别指出刃型位错和螺型位错中的位错线、柏氏矢量、滑移方向、受力方向、位错线运动方向之间的关系, 并分别说明两种位错的位错线运动方向的一般规律。(2012 年青岛科技大学)

七、如图所示有 A、B 两个刃型位错, 请指出这两个刃型位错分别是什么类型的刃型位错? 并用柏氏矢量回路画出这两个刃型位错的柏氏矢量。(2011 年青岛科技大学)



第五题



第七题

第二章 纯金属的结晶

第一节 金属结晶的基本规律

本节常见题型以名词解释、选择、判断、填空题为主,希望考生能注意零散的知识点。

※本章复习要点

1. 了解金属结晶的宏观现象和微观过程。
2. 掌握结晶的热力学条件和结构条件。

※本节重要考点

1. 掌握:结晶的热力学条件和结构条件。
2. 理解:结晶过程的驱动力与过冷度的关系。

※本节重要概念

过冷度,结构起伏

※考点精讲

1. 金属结晶必须过冷

(1) 过冷:金属的实际结晶温度 T_n 总是低于理论结晶温度 T_m , 这种现象称为过冷。

(2) 过冷度:金属的理论结晶温度与实际结晶温度之差,以 ΔT 表示, $\Delta T = T_m - T_n$

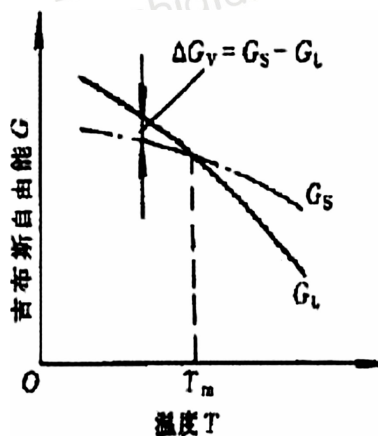
(3) 过冷度与金属的本性、纯度、冷却速度有关。

冷却速度越大,实际凝固温度越低,过冷度越大。过冷是凝固的必要条件之一。

2. 金属结晶的基本过程

结晶过程是形核和长大的过程。当液态金属过冷至理论结晶温度以下的实际结晶温度时,经过一段时间后首先在液体中形成具有某一临界尺寸的晶核,然后这些晶核再不断凝聚液体中的原子继续长大,与此同时,液态金属中又产生第二批晶核。以此类推,原有的晶核不断长大,同时又不产生新的第三批、第四批晶核……就这样液态金属不断形核,使液态金属越来越少,直到各个晶粒相互接触,液态金属耗尽,结晶过程结束。

3. 金属结晶的热力学条件



固态的自由能低于液态的自由能,即 $G_s < G_L$, 或 $\Delta G = G_s - G_L < 0$ 。只有在过冷的条件下,才能使 $G_s < G_L$, 或 $\Delta G = G_s - G_L < 0$ 。结晶的驱动力是 $\Delta G = G_s - G_L$

单位体积自由能差为: $\Delta G_v = -\Delta H_f \frac{\Delta T}{T_m}$

可知:过冷度越大,结晶驱动力越大

4. 金属结晶的结构条件

液体金属中,存在着不断变化的短程有序原子集团称为结构起伏,或称为相起伏。仿佛在液态金属中不断涌现出一些极微小的固体结构一样。根据结晶的热力学条件可以判断:只有在过冷液体中出现较大的相起伏才可能在结晶时转变为晶核,这些相起伏就是晶核的胚芽,称为晶胚。可见,结构起伏是形核的必要条件之二。

本节名校真题

一、名词解释:过冷度(2010 年青岛科技大学)

二、选择题:

液态金属的结构是金属原子呈_____。(2011 年华南理工大学)

A. 远程有序

B. 完全无序

C. 近程有序

三、填空题:

1. 金属结晶主要包括_____和_____两个基本过程。(2009 年青岛科技大学)

2. 纯金属的实际开始结晶温度总是低于理论结晶温度,这种现象称为_____,理论结晶温度与实际结晶温度之差称为_____。(2010 年华南理工大学)

四、判断题:

1. 金属平衡结晶时,冷却曲线上的平台温度是系统向外界散热热量与结晶潜热补偿温度热量相等的温度,因此,平台温度为金属理论结晶温度。(2009 年青岛科技大学)

2. 金属结晶时都遵循着形核和长大的一般规律,也就是说结晶分为两个阶段,形核阶段完成后,所有的晶核同步进入长大阶段。(2009 年青岛科技大学)

3. 金属结晶的过冷度越大,则实际结晶温度越高。(2012 年华南理工大学)

4. 液态金属的结构与固态相似,而气态金属根本不同。(2011 年华南理工大学)

五、简答题

简述金属结晶的热力学条件和结构条件(2012 年华南理工大学)

第二节 晶核的形成

本节常见题型以名词解释、选择、判断、填空题等小分值考题为主,也会出现分值稍大的题型,如公式推导和分析为内容的简答题。

本节的复习思路是

※本章复习要点

1. 掌握均匀形核、非均匀形核的形核条件。

2. 熟悉影响形核率的主要因素

※本节重要考点

1. 掌握:掌握非均匀形核、非均匀形核的特点和本质。

2. 运用高等数学和物理化学的知识,推到临界形核半径和临界形核功的公式,并弄清其物理意义。

※本节重要概念

临界形核半径,临界形核功,形核率

※考点精讲

1. 均匀形核

(1) 概念:过冷液体中各个区域出现新相固态晶核的几率是相同的,这种形核方式即为均匀形核。

(2) 晶胚形成时能量的变化(以球形晶胚为例):

$$\Delta G_{\text{均}} = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \sigma$$

驱动力:液相和固相的体积自由能差;阻力:表面自由能的增加

(3) 临界晶核半径: $r^* = \frac{2\sigma}{L_m} \frac{T_m}{\Delta T}$

当晶胚的半径 $r <$ 临界晶胚半径时,晶胚不能成晶核;当晶胚的半径 $r >$ 临界晶胚半径时,晶胚稳定下来成为晶核;当晶胚的半径 $r =$ 临界晶胚半径时,晶胚可能成为晶核,也可能消失。可知,过冷度 ΔT 增大时,临界晶胚半径减小,所需要的结构起伏小,晶核形成容易。

(4) 临界形核功

形成临界晶核时,体积自由能的降低只能抵偿表面能增加的 2/3,另外 1/3 表面能的增加则需要形核功来提供。形核功由液体中的能量起伏提供。

$$r^* = \frac{2\sigma}{L_m} \frac{T_m}{\Delta T}$$

可见,能量起伏是形核的必要条件之三。增大过冷度,临界形核功减小,所需能量起伏小,有利于形核。

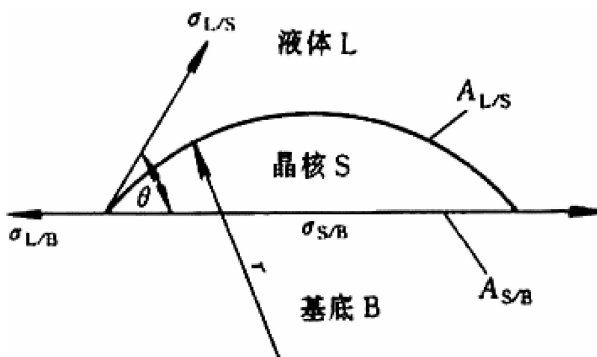
(5)形核率与过冷度的关系

形核率:单位时间单位体积液相内形成的晶核数目。

- ① 当过冷度 \geq 临界过冷度时,才可能形核。
- ② 形核率先是随着过冷度增加而增加,超过极大值后,随过冷度增大而减小。
- ③ 金属的凝固倾向极大,一般在达到极大值前,已经凝固完毕

2. 非均匀形核

(1) 概念:新相固态晶核优先出现在过冷液体中的某些区域,这种形核方式即为非均匀形核。



(2) 晶胚形成时能量的变化:

$$\Delta G_{\text{非}} = -V_S \Delta G_V + A_{S/B}(\sigma_{S/B} - \sigma_{L/B}) + A_{L/S} \sigma_{L/S}$$

(3) 临界晶核半径

$$r_{\text{非}}^* = \frac{2\sigma_{S/L}}{\Delta G_V} = r_{\text{均}}^*$$

可见,非均匀形核的临界晶核(曲率)半径与均匀形核的临界晶核半径相等,但非均匀形核的晶核为球冠状,体积小,形核所需结构起伏小,有利于形核。

(4) 临界形核功

$$\begin{aligned} r_{\text{非}}^* &= \frac{2\sigma_{S/L}}{\Delta G_V} = r_{\text{均}}^* \\ &= \frac{1}{3} A_{\text{均}}^* \sigma_{S/L} \left[\frac{2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta}{4} \right] \\ &= \frac{1}{3} A_{\text{均}}^* \sigma_{S/L} f(\theta) \end{aligned}$$

通常情况下,非均匀形核所需要的形核功小于均匀形核的形核功,形核所需能量起伏小,有利于

形核,或可以在低得多的过冷度下形核。

(5) 影响形核率的因素

① 过冷度的影响。与均匀形核相比,非均匀形核所需要过冷度小得多,而且随着过冷度增加,形核率增大至极大值后,还要下降一段,然后形核终止。

② 固体杂质的影响。若固体杂质的点阵结构与晶核点阵结构匹配,就可显著减小二者间的表面能,获得小的接触角 θ , 有效地促进非均匀形核;在曲率半径和 θ 角相同的情况下,固体杂质表面为凹面时晶核体积较小,形核较容易。

③ 物理因素。如振动、搅拌等。

本节名校真题

一、选择题:

1. 在非均匀形核中,外来杂质形状对形核有重要影响,其中_____对形核最为有利。(2010 年华南理工大学)

- A. 凹曲面状 B. 平面状 C. 凸曲面状

2. 纯金属凝固时,非均匀形核比均匀形核所需的过冷度要小得多,这是因为_____。(2012 年华南理工大学)

- A. 在未熔杂质上不需要再形核
B. 非均匀形核的临界形核半径较小
C. 非均匀形核的临界形核功较小

二、填空题:

液态金属凝固时有两种形核方式,即_____形核和_____形核,铸造生产中液态金属以_____形核的方式进行。(2011 年华南理工大学)

三、简答题

什么是非均匀形核?为什么实际金属的结晶过程主要按非均匀形核方式进行?(2011 年华南理工大学)

四、名词解释

1. 均匀形核和非均匀形核(2010 年华南理工大学)
2. 比较均匀形核与非均匀形核的异同点。(2011 年河北工业大学)

五、公式推导题(2011 年青岛科技大学)

纯金属结晶时形成一个半径为 r 的球体,请根据形核前后体系自由能的变化推导:

- (1) 临界晶核半径的表达式;
(2) 临界形核功与形核界面能的关系。

第三节 晶核的长大

本节常见题型以名词解释、选择、判断、填空题等小分值考题为主,也会出现分值稍大的题型,如以原理分析为内容的简答题。

※本章复习要点

1. 理解晶体长大机制的实质、热力学条件和动力学条件。
2. 掌握界面微观结构和温度梯度对晶体长大形态的影响
3. 掌握生产中细化铸件晶粒的常用方法以及原理

※本节重要考点

1. 掌握:界面微观结构和温度梯度对晶体长大形态的影响。
2. 重点掌握:生产中细化铸件晶粒的常用方法以及原理
3. 理解:晶体长大机制的实质、热力学条件和动力学条件。

※本节重要概念

正温度梯度和负温度梯度,光滑界面和粗糙界面

※考点精讲

1. 晶核长大的实质和必要条件

(1) 实质——是液相原子迁移到固相上的速率大于固相原子迁移到液相上的速率,使固-液界面向液体中推进。

(2) 热力学条件——即要求固-液界面前沿液体中有一定过冷度,这种过冷度称为动态过冷度。只有这样,晶体长大时的体积自由能的降低才会大于晶体表面能的增加,符合长大过程的能量条件。固相界面接纳液相原子的难易程度与界面微观结构有关。

(3) 动力学条件——即液相原子能不断地向固液界面扩散提供原子,这就要求液相有足够的温度,以使液态金属原子具有足够的扩散能力。固相界面接纳液相原子的速度也与界面微观结构有关。

2. 固-液界面的微观结构与晶体生长机制

(1) 光滑界面的微观结构与晶体生长机制

1) 光滑界面的微观结构:从原子尺度看,界面是光滑平整的,液、固两相被截然分开。在光学显微镜下,光滑界面由曲折的若干小平面组成,又称小平界面。

2) 光滑界面的生长机制:包括二维晶核生长机制和依靠晶体螺型位错台阶长大机制。二维晶核如同均匀形核那样,在平整界面上形成具有一定宽度的平面原子集团的核心。

(2) 粗糙界面的微观结构与晶体生长机制

1) 粗糙界面的微观结构:从原子尺度看,界面是高低不平的,液、固两相间存在几个原子间距厚度的过渡层。在过渡层中,液相与固相的原子犬牙交错的分布着。在光学显微镜下,粗糙界面是平直

的,又称非小平面界面。

2)粗糙界面的生长机制:在粗糙界面上,几乎有一半的空位可接受原子,液体原子很容易进入空位与晶体连接。由于所有位置都是生长位置,所以液相原子可以连续地向界面添加,界面的性质永远不变,从而使界面沿其法线方向迅速地向液相推进。这种长大方式称为连续长大,也称垂直生长。

3. 液固界面前沿液体中的温度梯度

(1)正温度梯度:正温度梯度是指液相中的温度随至界面距离的增加而提高的温度分布状况。其结晶前沿液体中的过冷度随至界面距离的增加而减小。此时所产生的结晶潜热主要通过型壁传到散出。

(2)负温度梯度:负温度梯度是指液相中的温度随至界面距离的增加而降低的温度分布状况,即其过冷度随至界面距离的增加而增大。此时所产生的结晶潜热主要通过尚未结晶的过冷液相散失。

4. 晶体长大形态与温度梯度、界面微观结构的关系

(1)在正温度梯度下,具有粗糙界面结构的晶体,其界面为平行于熔点 T_m 等温面的平直面,长大方式为平面长大方式;具有光滑界面结构的晶体,其显微界面呈小台阶状,与熔点 T_m 等温面呈一定角度分布着,但从宏观来看,熔点 T_m 等温面仍为平行于的平直面,这种情况有利于形成具有规则形状的晶体(大多成长为以密排面为表面的晶体)。

(2)在负温度梯度下,具有粗糙界面结构的晶体呈树枝状长大形态;具有光滑界面结构的晶体,有的出现树枝状长大特征,有的则仍保持小台阶状长大形态。

5. 长大速度

(1)长大速度(长大线速度)与过冷度的关系

当界面过冷度大于动态过冷度时,晶体才能长大。具有粗糙界面的大多数金属,动态过冷度很小,在较小的过冷度下即可获得较大的长大速度,其长大速度一般随过冷度的增大而增加。

(2)晶体长大的要点如下:

1)一般金属具有粗糙界面,其长大机制为连续长大,长大速度大,所需过冷度小。

2)半金(如 Si、Sb 等)或非金属,具有光滑界面,其长大机制有两种方式:其一为二维晶核长大方式,其二为螺型位错长大方式,它们的长大速度都很慢,所需过冷度较大。

3)晶体成长的界面形态与界面前沿的温度梯度和界面的微观结构有关,在正的温度梯度下长大时,光滑界面的一些小晶面互成一定角度,呈锯齿状;粗糙界面的形态为平行于 T_m 等温面的平直界面,呈平面长大方式。在负的温度梯度下长大时,一般金属和半金属的界面都呈树枝状,只有一些无机化合物仍然保持着光滑界面形态。

6. 金属铸件晶粒大小的控制

常温下,晶粒越细小,强度越高,塑性越好。因此控制铸件晶粒的大小具有重要的实际意义。铸件晶粒大小取决于两个重要因素:形核率 N 和长大速度 G 。 N/G 的比值越大,晶粒越细小。通过增

大形核率 N 或减小长大速度 G 或增加 N/G 的比值,都会使晶粒细化。常用方法有:

(1) 增加过冷度(适于小件和薄壁件)。

(2) 变质处理(适于大件和厚壁件)。

(3) 浇注时,采用振动和搅拌等方法。

本节名校真题

一、选择题:

金属结晶后晶粒大小取决于结晶时的形核率 N 和长大速度 G ,要细化晶粒必须_____。(2010 年华南理工大学)

A. 增大 N 和 G

B. 增大 N 、降低 G

C. 降低 N 、增大 G

二、填空题:

1. 在纯金属结晶时,晶体按照平面状方式长大的条件是_____。(2010 年华南理工大学)

2. 金属结晶后晶粒大小取决于结晶时的形核率 N 和长大速度 G ,要细化晶粒必须_____。
(2010 年华南理工大学)

3. 纯金属凝固时,要得到枝晶组织,界面前沿液体中的温度梯度必须为_____,要实现定向凝固,界面前沿液体中的温度梯度必须为_____(2012 年华南理工大学)

4. 从原子尺度看,生长着的晶体的固液界面可以分为_____和_____两类微观结构(2010 年青岛科技大学)

二、判断题:

1. 金属结晶时过冷度越大,结晶后晶粒越细。(2011 年华南理工大学)

2. 过冷度越大,晶体生长速度越快,晶粒长得越粗大。(2013 年哈尔滨工业大学)

3. 无论温度分布如何,常用纯金属生长都是呈树枝状界面。(2007 年青岛科技大学)

三、简答题

1. 简述纯金属长大形态与温度梯度的关系。(2011 年河北工业大学)

2. 在铸锭生产中,采用哪些措施控制晶粒大小? 在生产中如何应用变质处理?(2011 年河北工业大学)

第四节 金属铸锭的宏观组织与缺陷

本节的复习思路是

本节常见题型以选择、填空题等小分值考题为主,也会出现分值稍大的题型,如以原理分析为内容的简答题。

本节的复习思路是运用高等数学和物理化学的知识,推到临界形核半径和临界形核功的公式,并弄清其物理意义。

※本章复习要点

1. 了解得到发达的柱晶区或等轴晶区应该采取的措施及其基本原理
2. 掌握铸锭三晶区形成的原因及每个晶区的组织和性能特点

※本节重要考点

1. 得到发达的柱晶区或等轴晶区应该采取的措施及其基本原理。
2. 掌握:铸锭三晶区形成的原因及每个晶区的组织和性能特点

※本节重要概念

缩孔,气孔,夹杂物

※考点精讲

1. 金属铸锭的宏观组织及其特点

(1)外表层的等轴细晶区。

外表层由细小的等轴晶所组成。组织致密,力学性能好,但厚度一般都很薄。

(2)中间的柱状晶区

柱状晶区由垂直于型壁的粗大柱状晶所构成。晶粒彼此间的界面比较平直,组织比较致密。但当沿不同方向生长的两组柱状晶相遇时,会形成柱晶间界。柱晶间界是杂质、气泡、缩孔较富集的地方,因而是铸锭的脆弱结合面,简称弱面。

(3)中心等轴晶区

1) 优点:与柱状晶区相比,等轴晶区的各个晶粒在长大时彼此交叉,枝叉间的搭接牢固,裂纹不易扩展;不存在明显的弱面;各晶粒的取向各不相同,其性能也没有方向性。

2) 缺点:等轴晶的树枝状晶体比较发达,分枝较多,因此显微缩孔较多,组织不够致密。但显微缩孔一般均未氧化,因此铸锭经热压力加工之后,一般均可焊合,对性能影响不大。可见,一般的铸件,尤其是铸件,都要求得到发达的等轴晶组织。

2. 铸锭组织的缺陷

(1)缩孔。

1) 形成:金属铸件在凝固冷却期间,由于液态及凝固收缩,若在铸件最后凝固的地方没有得到液态金属或合金的补缩,就会形成孔洞。通常把分散和细小的孔洞称为缩松,大而集中的孔洞称为缩孔。一些纯金属、接近共晶成分的合金易产生缩孔。

2) 危害:有效承载面积减小;导致应力集中,可能成为裂纹源;降低铸件的气密性,特别是承受压应力铸件,容易产生泄露而报废。

(2)气孔

1) 形成:当金属液体凝固时,其中所溶解的气体(氢气、氧气和氮气等)将以分子状态逐渐富集于固液界面前沿的液体中,形成气泡。这些气泡长大到一定程度后便可能上浮,若铸锭表面已经凝固而

未能浮出表面,则气泡将保留在铸锭内部,形成气孔。

2)危害:与缩孔类似。靠近铸锭表层的皮下气孔,则可能由于表皮破裂而被氧化,在压力加工时不能焊合,易在表面形成裂纹。

(3)夹杂物

铸锭中的夹杂物,根据来源可分为两类:一类称为外来夹杂物,如在浇注过程中混入的耐火材料;另一类称为内生夹杂物,它是在液态金属冷却过程中形成的,如金属与气体形成的金属氧化物或其他金属夹杂物,当除不尽时即残留在铸锭内,其形状、大小和分布随夹杂物不同而不同,通常在光学显微镜下都可以观察到。

夹杂物的存在对铸锭(件)的塑韧性会产生不良影响。

本节名校真题

一、选择题:

铸件在凝固时若不出现成分过冷,则铸件组织将是:(2012 年华南理工大学)

A. 全部等轴晶

B. 全部柱状晶

C. 柱状晶 + 中心等轴晶

二、填空题:

铸锭组织的三个晶区分别为____、____、____。(2007 年青岛科技大学)

三、简答题

简述钢锭中常见的宏观组织缺陷,消除或改善方法。(2011 年河北工业大学)

第三章 二元合金的相结构与结晶

第一节 合金的相结构

本节常见题型以名词解释、选择、判断、填空题为主,也会出现分值稍大的题型,如以原理分析为内容的简答题。

※本章复习要点

1. 了解固溶体和金属间化合物在合金中的作用。
2. 掌握金属材料中相结构的基本类型和各种相的形成规律、结构特点、性能特点。

※本节重要考点

1. 重点掌握:固溶体的基本类型和各种相的形成规律、结构特点、性能特点。
2. 掌握:金属间化合物的基本类型和各种相的形成规律、结构特点、性能特点。
3. 理解:间隙固溶体、间隙化合物、间隙向的成分、结构和性能特点。

※本节重要概念

合金,固溶强化,置换固溶体。

※考点精讲

1. 合金中的相

(1) 合金:两种或两种以上的金属,或金属与非金属,经熔炼或烧结,或用其他方法组合而成的具有金属特性的物质。

(2) 组元:组成合金最基本的、独立的物质,简称元。

(3) 相:相是合金中晶体结构相同、成分和性能均一并以界面相互分开的组成部分。由一种固相组成的合金称为单相合金,由几种不同固相组成的合金称为多相合金。

2. 固溶体

根据相的晶体结构特点可以将其分为固溶体和金属间化合物两大类。

(1) 固溶体的概念

固溶体是固态下一种组元(溶质)溶解在另一种组元(溶剂)中形成的新相,其特点是具有溶剂组元的点阵类型。晶格与固溶体相同的组元称为溶剂,其他的组元即为溶质。工业上所使用的金属材料,绝大多数以固溶体为基体,有的甚至完全由固溶体组成,适合于变形成形。

(2) 固溶体的分类

1) 按溶质原子在晶格中所占位置不同,可将固溶体分为置换固溶体和间隙固溶体。

- 2)按溶质组元在固溶体中的溶解度(或固溶度)不同,可将固溶体分为有限固溶体和无限固溶体。
- 3)按溶质原子与溶剂原子的相对分布不同,可将固溶体分为无序固溶体和有序固溶体。有序固溶体可以是置换式的有序,也可以是间隙式的有序。

(3) 置换固溶体

金属元素彼此之间一般都能形成置换固溶体,但固溶度的大小往往相差十分悬殊。哪些因素影响置换固溶体的固溶度?

- ① 原子尺寸因素,即两组元间的原子尺寸相对大小 Δr 。有利于大量固溶的原子尺寸条件是 $\Delta r \leq 15\%$ 。
- ② 电负性因素,电负性差值越大,则越不利于形成固溶体,而易于形成化合物。
- ③ 电子浓度因素,电子浓度是指合金晶体结构中的价电子总数与原子总数之比,即 e/a 。在尺寸因素有利的情况下,以IB族金属为基的固溶体,不同溶质元素在其中的固溶度达到最大值时所对应的电子浓度值为某一定值,固溶体的电子浓度超过此极限值,固溶体就不稳定而形成另外的新相。这说明,溶质在溶剂中的固溶度受电子浓度的控制,溶质元素的原子价越高,则其在金银铜中的固溶度越小

- ④ 晶体结构因素,溶质与溶剂的晶体结构相同是置换固溶体形成无限固溶体的必要条件。

(4) 间隙固溶体

一些原子半径小于0.1nm的非金属元素(H、N、C、B)与过渡族金属,且当溶质与溶剂的原子半径比值 <0.59 时,能形成间隙固溶体。其固溶度主要取决于:

- ① 溶质原子的大小。
- ② 溶剂的晶格类型. 与BCC的相比, FCC的固溶度较大。

注意:间隙固溶体只能是有限固溶体。

(5) 固溶体的结构

虽然固溶体仍保持着溶剂的晶格类型,但与纯组元相比,结构还是发生了变化,有的变化还相当大,主要表现在以下几个方面:

① 晶格畸变。晶格畸变的大小可由晶格常数的变化所反映。形成置换固溶体时,晶格常数随着溶质原子的溶入而变大或变小。形成间隙固溶体时,晶格常数总是随着溶质原子的溶入而变大。

② 从微观上看,无序固溶体中可能存在偏聚和短程有序。当同种原子间的结合力大于异种原子间的结合力时,溶质原子倾向于成群地聚集在一起,形成偏聚区;反之,当异种原子间的结合力大于同种原子间的结合力时,则溶质原子的近邻皆为溶剂原子,溶质原子倾向于按一定的规则呈有序分布,这种有序分布通常只在短距离小范围内存在,称之为短程有序。

③ 有序固溶体

当温度低于某一温度时,无序固溶体中的溶质原子会在整个晶体中都按一定顺序排列起来,既由短程有序转变为有序,这样的固溶体称为有序固溶体,或称为超结构、超点阵。有序固溶体有确定的化学成分,可用化学式来表示其组成。严格说来,有序固溶体实质上是介于固溶体和化合物之间的一个相,但更接近于化合物。

(6) 固溶体的性能

① 产生固溶强化。在固溶体中,随着溶质浓度的增加,固溶体的强度、硬度提高,塑性、韧性有所下降,这种现象称为固溶强化。间隙原子造成的晶格畸变比置换原子的大,所引起的晶格畸变较大,强化效果也较好。

② 固溶体的电阻率升高。

③ 当无序固溶体转变为有序固溶体时,硬度和脆性显著增加,而塑性和电阻则明显降低。

3. 金属间化合物

概念:当溶质原子的加入量超过固溶体的固溶度极限时,还会形成一种新相,其晶体结构均不同于任一组元,由于这种新相具有金属性质,所以称为金属化合物,又称中间相。

应用:金属间化合物是结构材料和工具材料不可缺少的增强相,如 Fe_3C 、 CuZn 、 CuAl_3 。此外,由于结合键和晶体结构的多样性,使金属间化合物具有许多特殊的物理化学性能,成为新的功能材料和耐热材料,其中已有不少正在开发应用,如 GaAs 、 Nb_3Sn 、 NiTi 和 CuZn 、 LaNi_5 等

(1) 正常价化合物——两种电负性较大的元素以化合价规律形成的化合物

组元:通常由金属元素与ⅣA、ⅤA、ⅥA族元素组成,其电负性差值较大。遵守化合价规则,组元成分固定不变。

结合键:以离子键、共价键或金属键为主。

性能:一般具有较高的硬度,脆性较大。

举例: MgS 、 MnS 、 Mg_2Si 、 Mg_2Sn 、 Mg_2Pb 、 AlN 、 SiC 等。 MnS 是钢铁材料中常见的夹杂物, Mg_2Si 是铝合金强化相

(2) 电子化合物——价电子浓度符合某些特定值的化合物

组元:通常由ⅠB族或过渡族金属元素与ⅡB、ⅢA、ⅣA族元素组成。

结合键:以金属键为主,离子键或共价键为辅

晶体结构:按照一定电子浓度的比值形成的化合物,电子浓度不同,所形成的化合物的晶体结构也不同。不遵守化合价规则,虽然可用化学式表示,但其成分在一定范围变化,因此可看作是以化合物为基的固溶体。

性能:一般具有较高的硬度,但脆性较大。

举例: CuZn 、 CuAl_3 、 Cu_3Sn 、 AgZn 、 FeAl 、 NiAl 的电子浓度为 $3/2$,体心立方结构。

(3) 间隙相和间隙化合物

1) 组元:通常由过渡族金属元素与原子半径很小的非金属元素 H、N、C、B 所组成。

2) 晶体结构:主要受组元的原子尺寸因素控制。

当 $r_x/r_M < 0.59$ 时,形成具有简单晶体结构(面心立方、体心立方、密排六方或简单立方)的化合物,称为间隙相。间隙相不但可以溶解组元元素,而且可以溶解其他间隙相,如 $\text{TiC} - \text{ZrC}$ 、 $\text{TiC} - \text{VC}$ 、 $\text{TiC} - \text{NbC}$ 、 $\text{VC} - \text{NbC}$ 。

当 $r_X/r_M > 0.59$ 时,形成具有复杂晶体结构的化合物,称为间隙化合物. Cr、Mn、Fe 的碳化物均属此类。

3)性能:

①间隙相具有极高的熔点、硬度和明显的金属特性(导电、导热、金属光泽). 它们是硬质合金、合金工具钢和高温金属陶瓷的重要组成相,也是常用的耐磨涂层材料。

②间隙相化合物也具有很高的熔点和硬度,但与间隙相相比,它们的熔点和硬度要低一些,而且加热时也较易分解。

4)举例: Fe_4N 、VC、 TiH_2 、WC 等是钢中常见的间隙相。 Fe_3C 、 Cr_7C_3 、 $Cr_{23}C_6$ 、 Fe_3W_3C 、 Fe_4W_2C 等是钢中常见的间隙化合物。其中的 Fe_3C 是钢铁材料中的一种基本组成相,称为渗碳体。 $(Fe, Mn)_3C$ 、 $(Fe, Cr)_3C$ 等称为合金渗碳体

本节名校真题

一、名词解释:

置换固溶体(2011 年华南理工大学);相(2011 年河北工业大学);合金(2011 年河北工业大学)

二、填空题:

1. 二元合金的相结构可分为两大类,即_____和_____。(2010 年华南理工大学)
2. 不同组元形成合金,形成固溶体或金属间化合物时,受_____因素、_____因素和_____因素控制。(2012 年华南理工大学)

三、选择题: (2013 年哈尔滨工业大学)

1. 与固溶体相比,金属间化合物的性能特点是_____。
- A. 熔点高、塑性低 B. 硬度低、塑性高 C. 硬度低、塑性低

四、问答题:

1. 论述溶质与溶剂的原子尺寸、电负性和电子浓度对金属化合物的影响规律。(2011 年华南理工大学)
2. 试比较间隙固溶体、间隙相、间隙化合物的异同点。(2012 年江苏大学)
3. 请简要说明何谓固溶体、何谓金属间化合物? 她们各自有何特点,有何不同?(2005 年中山大学)
4. 为什么只有置换固溶体的两个组元之间才能无限互溶,而间隙固溶体不能?(2007 年青岛科技大学)

第二节 二元合金相图的建立

本节常见题型以名词解释、填空题为主。杠杆定律作为计算方法常出现在综合题中。

※本章复习要点

1. 了解相图的应用。
2. 熟悉热分析法建立相图的过程。
3. 熟悉相率的表达式及作用

4. 掌握运用杠杆定律计算两平衡相的相对含量的方法。

※本节重要考点

1. 重点掌握:运用杠杆定律计算两平衡相的相对含量
2. 掌握:热分析法建立相图的方法。
3. 理解相率的含义

※本节重要概念

相图,相率,杠杆定律。

※考点精讲

1. 相图和相律

(1) 相图

相图是描述在平衡条件下合金中相的状态(类型、数量)与温度、压力、成分之间关系的图解,又称为状态图或平衡图。利用相图,可以知道不同成分的合金在不同温度下的平衡状态,它存在哪些相、相的成分及相对含量如何,以及在加热或冷却时可能发生那些转变等。二元系合金通常采用温度 T - 二元成分 x 二维坐标图,其中 T 为纵坐标, x 为横坐标。

(2) 相律及其应用

相律是描述合金系统的组元数 C 、平衡共存的相的数目 P 和自由度 F 之间关系的法则。

相律通式: $F = C - P + 2$ ($F \geq 0$)

当系统压力恒定时, $F = C - P + 1$ ($F \geq 0$)

当系统压力、温度均恒定时, $F = C - P$ ($F \geq 0$)

相律是理解、分析相图重要的理论依据。利用相律:

- ① 可以判断在一定条件下系统最多可能平衡共存的相数目;
- ② 可以判断测绘的相图是否正确;
- ③ 利用相律可以解释纯金属与二元合金结晶时的一些区别。

2. 二元合金相图的建立

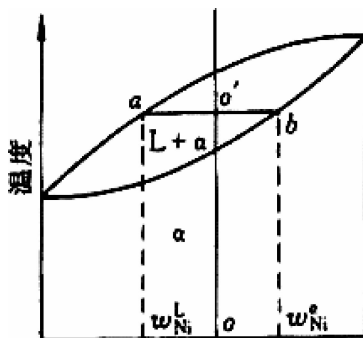
——以 $\text{Cu} - \text{Ni}$ 合金为例,说明用热分析法测定二元相图的过程。

(1) 配制一系列不同成分的 $\text{Cu} - \text{Ni}$ 合金,测定这些合金在冷却曲线。每个合金的冷却曲线上有两个转折点,所对应的温度代表两个临界点,温度较高的临界点是结晶开始温度,称为上临界点,温度较低的临界点是结晶终了温度,称为下临界点。纯镍和纯铜的冷却曲线都是一水平线段,只有一个临界点。

(2) 将上述临界点标在温度成分坐标图上,再将两类临界点连接成线,得到 $\text{Cu} - \text{Ni}$ 合金相图。其中上临界点的连线称为液相线,表示合金结晶的开始温度或加热过程中熔化终了温度;下临界点的连线称为固相线,表示合金结晶的终了温度或加热过程中熔化开始温度。这两条线把 $\text{Cu} - \text{Ni}$ 合金相图

划分成三个区.

在液相线以上,所有的合金都处于液态,是液相单相区,用 L 表示;在固相线以下,所有的合金都已结晶完毕,是固相单相区,以 α 表示;在液相线和固相线之间,所有的合金已开始结晶,但结晶过程尚未结束,是液相和固相两相并存区,以 $\alpha + L$ 表示。



3. 杠杆定律

根据相律,若温度恒定时,二元系合金两相平衡共存时自由度 $F=0$,说明在此温度下,两个平衡相的成分也随之而定。那么,如何计算某一合金在给定温度下,两个平衡相的相对含量?

$$\frac{W_L}{W_0} = \frac{C_\alpha - C_0}{C_\alpha - C_L} = \frac{rb}{ab} \quad \frac{W_\alpha}{W_0} = \frac{C_0 - C_L}{C_\alpha - C_L} = \frac{ar}{ab}$$

本节名校真题

一、名词解释:(2010 年青岛科技大学)

1. 相图, 相律

二、填空题:

1. 当系统的压力为常数时,相律的表达式为_____。当组元数 2 时,共存相得最大数为_____,此时自由度为_____。(2011 年华南理工大学)
2. 二元相图中,同时共存的平衡相数最多为_____个,表现在相图中为_____。(2011 年青岛科技大学)

第三节 匀晶相图及固溶体结晶

本节常见题型以名词解释、填空题为主,也会出现以原理分析为内容的简答题,且分值较大。

※本章复习要点

1. 熟悉匀晶相图和匀晶转变
2. 熟悉固溶体合金的平衡结晶过程,结晶后的组织状态,相的相对量计算,以及组织与性能的影响规律。
3. 成分过冷的形成以及成分过程对固溶体晶体生长形态和组织的影响
4. 了解固溶体合金的平不平衡结晶过程,结晶后的组织特点。

※本节重要考点

1. 重点掌握:固溶体合金的平衡结晶过程,结晶后的组织状态,相的相对量计算,以及组织与性能的影响规律
2. 掌握:成分过冷的形成以及成分过程对固溶体晶体生长形态和组织的影响
3. 理解固溶体合金的不平衡结晶过程,结晶后的组织特点。
4. 理解固溶体合金结晶时的溶质分配
5. 能够根据均晶相图大致判断合金的性能

※本节重要概念

非平衡结晶,枝晶偏析,平衡分配系数,成分过冷

※考点精讲

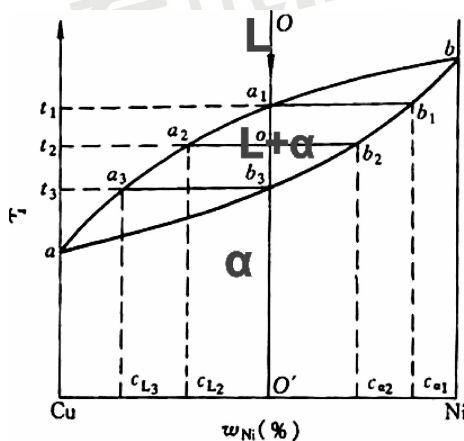
1. 匀晶相图分析

两组元在液态和固态下都能无限互溶的二元系所形成的相图,称为匀晶相图。

在这类合金中,结晶时都是从液相结晶出单相的固溶体,这种结晶过程称为匀晶转变。 $L \rightarrow \alpha$

匀晶相图分析: 两条线:液相线,固相线。三个区域: L 、 $(\alpha + L)$ 和 α

2. 固溶体合金的平衡结晶过程



平衡结晶是指在极缓慢冷却条件下进行结晶的过程。

成分为 O 的合金自高温缓慢冷却至 t_1 温度时,开始从液相中析出 α 固溶体,根据平衡相成分的确 定方法,可知液相的成分为 L_1 ,固相成分为 α_1 。当温度缓慢冷却至 t_2 温度时,便有一定数量的 α 固溶 体结晶出来,此时的固相成分为 α_2 ,液相的成分为 L_2 。为了达到平衡,除了在 t_2 温度直接从液相中结 晶出的 α_2 外,原有的 α_1 相也必须改变为与 α_2 相同的成分。与此同时,液相成分也由 L_1 向 L_2 变化。在 温度不断下降过程中, α 的成分将不断地沿固相线变化,液相成分将不断地沿液相线变化。同时, α 相的数量不断增多,而液相 L 的数量不断减少,两相的含量可用杠杆定律求出。当温度缓慢冷却至 t_3 温度时,最后一滴液体结晶成固溶体,结晶完毕,得到与原合金成分相图的 α 固溶体。

3. 固溶体合金结晶的特点(与纯金属相比)

① 相同点:基本过程:形核-长大;

必要条件: $\Delta T > 0$

结构起伏——临界晶核半径

能量起伏——临界形核功

② 不同点:结晶需要一定的温度范围

异分结晶——需成分起伏

结晶出的固相与母相化学成分不同的结晶称为选分结晶,或称选分结晶。

既然固溶体结晶属于异分结晶,那么在结晶时的溶质原子必然要在液相和固相之间重新分配,这种溶质原子的重新分配程度通常用分配系数表示。

平衡分配系数 k_0 :在一定温度下,固液两平衡相中的溶质浓度之比值, $K_0 = C_s/C_L$

讨论:

当 $K_0 < 1$ 时,液相线和固相线之间的水平距离越大,则 K_0 值越小;

当 $K_0 > 1$ 时,液相线和固相线之间的水平距离越大,则 K_0 值越大。

K_0 值的大小反映了溶质组元重新分配的强弱程度。

4. 固溶体合金的不平衡结晶

由上述固溶体的结晶过程可知,固相 α 在形成过程中成分是变化的,与合金的平均成分不一致,而在最后形成成分与合金成分一致的均匀固溶体 α 相,因而固溶体的结晶过程是和液相及固相内的原子扩散过程密切相关的。固溶体合金结晶过程中有两类扩散,一种是在单相(L 或 α)内进行的体内扩散,另一种是 α/L 两相界面处发生的相间扩散。只有在极缓慢的冷却条件下,即在平衡结晶条件下,才能使每个温度下的扩散过程进行完全,使液相或固相的整体处于均匀一致。

(1) 不平衡结晶

在实际生产中,液态合金的冷却速度较大,在一定温度下扩散过程尚未进行完全时温度就继续下降了,这样就使得液相尤其是固相内保持着一定的浓度梯度,造成各相内成分的不均匀。这种偏离平衡结晶条件的结晶,称为不平衡结晶。在分析不平衡结晶时,通常假设液体的成分可以通过扩散、对流或搅拌等作用完全均匀化,而固相内却来不及进行扩散。

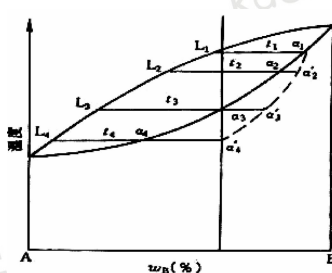


图 5-16 匀晶系合金的不平衡结晶

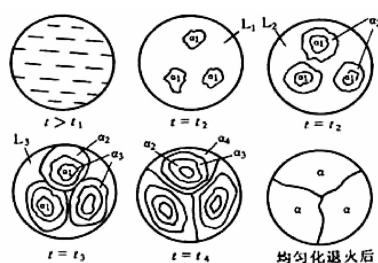


图 5-17 不平衡结晶引起的晶内偏析

(2) 不平衡结晶过程分析

由图可知,成分为 C_0 的合金过冷至 t_1 温度开始结晶,首先析出成分为 α_1 的固相,液相的成分为 L_1 。当温度下降至 t_2 时,析出的固相成分为 α_2 ,它是依附在 α_1 晶体的周围生长的。如果是平衡结晶,通过扩散,晶体内部由 α_1 成分变化至 α_2 ,但是由于冷却速度快,固相内来不及进行扩散,结果使晶体内外成分很不均匀。此时整个已结晶的固相成分为 α_1 和 α_2 的平均成分 α_2' 在液相内,由于能充分进行混合,使整个液相的成分时时处处均匀一致,沿液相线变化至 L_2 。当温度继续下降至 t_3 时,析出的固相成分为 α_3 ,同样由于固相内来不及进行扩散,此时整个已结晶固相的实际成分为 α_1 、 α_2 、 α_3 的平均成分 α_3' ,液相的成分沿液相线变化至 L_3 。此时如果是平衡结晶的话, t_3 温度已相当于结晶完毕的固相线温度,全部液相应在此温度结晶完毕,已结晶的固相成分应为合金成分 C_0 。但是由于是不平衡结晶,已结晶固相的平均成分不是 α_3 ,而是 α_3' ,与合金的成分 C_0 不同,仍有一部分液体尚未结晶,一直要到 t_4 温度才能结晶完毕。此时固相的平均成分由 α_3' 变化到 α_4' ,与合金原始成分 C_0 一致。若把每一温度下的平均成分点连接起来,得到图虚线所示的平均成分线。平均成分线的位置与冷却速度有关。

(3) 不平衡结晶的显微组织

固溶体不平衡结晶的结果,使每个晶粒内部的化学成分不均匀,先结晶的部分含高熔点组元较多,后结晶的部分含低熔点组元较多,这种在一个晶粒内部化学成分不均匀的现象称为晶内偏析。由于固溶体晶体通常呈树枝状,使枝干和枝间化学成分不同,所以称为枝晶偏析。

影响晶内偏析的因素:

- ①分配系数 K_0 ;
- ②溶质原子的扩散速度。

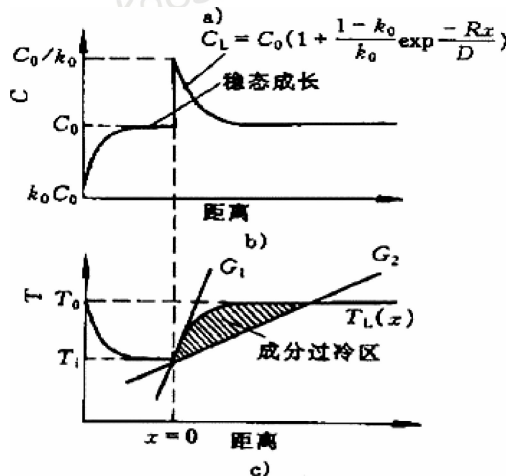


图 6-20 成分过冷的产生示意图

5. 成分过冷对固溶体生长形态的影响

(1) 成分过冷的形成

固溶体合金在非平衡结晶时,由于溶质组元再重新分布,在固液界面前沿的液相中形成溶质的浓度梯度,使液体的实际温度低于其理论熔点,从而产生了一个过冷区。因此,称为成分过冷。

产生成分过冷的条件:

$$\frac{G}{R} \leq \frac{mc_0}{D} \left(\frac{1 - k_0}{k_0} \right)$$

(2) 成分过冷对固溶体晶体生长形态的影响

① 若液体的实际温度梯度大于临界温度梯度时,则不会产生成分过冷,这是固溶体合金的结晶和纯金属一样,在正的温度梯度下晶体生长以平面式向前推进,铸锭组织为等轴晶

② 若液体的实际温度梯度明显小于临界温度梯度时,则形成很大成分过冷区,这时晶体以树枝状生长,得到发达的树枝状晶组织。

③ 当成分过冷区较小时,晶体表面前沿只能稍稍突向伸展于液体中,小的成分过冷限制了它的生长,不能形成树枝晶。这种生长方式称为胞状生长。形成的胞状结构在横截面上呈规则的六角形,在纵截面上则为一组平行的棒状晶体。

6. 根据匀晶相图判断固溶体合金的性能

(1) 判断固溶体合金的力学

性能和物理性能合金的强度、硬度和导电性与相图上的固溶度有关。

固溶度大→晶格畸变严重→强度和硬度高,导电、导热性能降低。

(2) 判断合金的铸造性能

合金的流动性、缩孔及热裂倾向等主要取决于合金相图上的液相线与固相线之间的水平距离与垂直距离。

水平距离大→液固两相成分间隔大, k_0 小→成分过冷区宽→整个液体形核,并枝晶生长→较宽的液固两相混合区→“糊状凝固”,流动性差→形成分散缩孔

垂直距离大→凝固温度间隔大→凝固时间长→“糊状凝固”严重,流动性更差→分散缩孔严重,热裂倾向大

本节名校真题

一、名词解释:

平衡分配系数。(2009 年青岛科技大学)

二、填空题:

固溶体合金结晶时,其平衡常数 K_0 表示了固液两平衡相中的____之比,当 $K_0 < 1$ 时, K_0 越小,则液相线何固相线之间的水平距离越____,且非平衡晶体的成分偏析越____。当产生晶内偏析时,工业上常用____法加以消除。(2011 年华南理工大学)

三、什么是成分过冷? 画出示意图分析图成分过冷的形成,并说明成分过冷对晶体长大方式即铸锭组织的影响。(2013 年哈尔滨工业大学)

第四节 共晶相图及其合金的结晶

本节常见题型有名词解释、填空题和选择题以及以原理分析为内容的简答题。

※本章复习要点

1. 熟悉共晶相图和共晶转变
2. 掌握共晶相图合金的平衡结晶过程, 结晶后的组织状态, 相的相对量计算, 以及组织与性能的影响规律。
3. 掌握共晶相图合金的不平衡结晶过程, 结晶后的组织特点。

※本节重要考点

1. 重点掌握: 亚共晶合金、共晶合金、过共晶合金的平衡结晶过程, 结晶后的组织状态, 相组成物和组织组成物的相对量计算。
2. 掌握: 伪共晶和离异共晶的形成条件、形态特征以及消除方法。
3. 理解共晶合金相图对合金铸造性能的影响机理, 并能够根据合金相图大致判断合金的铸造性能。

※本节重要概念

共晶转变, 共晶体, 伪共晶, 离异共晶

※考点精讲

1. 共晶相图与共晶转变

(1) 共晶相图: 两组元在液态无限互溶, 在固态有限互溶或完全不溶, 且冷却时发生共晶反应的相图。

相图分析:

点: 最大溶解度点; 共晶点。

线: 液相线, 固相线; 溶解度

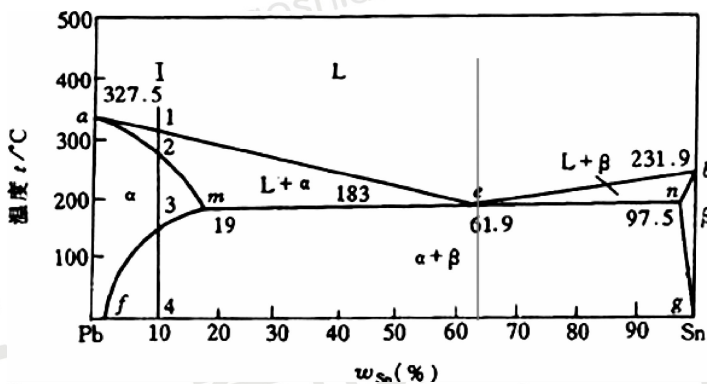
曲线; 共晶转变线。

区: 3 个单相区; 3 个两相共存区; 1 个三相共存区 (即与三个两相区接触的水平线)

(2) 共晶转变: 由某一成分的液相在恒温下同时结晶出两个一定成分的固相的反应称为共晶转变或共晶反应。

反应式: $L = (\alpha_m + \beta_n)$ 发生共晶反应的温度称为共晶温度, 共晶反应的产物称为共晶组织。e 点称为共晶点, 成分对应于 e 点的合金称为共晶合金。

2. 典型合金的平衡结晶及其组织



(1) 含锡量 $w_{Sn} \leq 19\%$ 的合金(合金 I)

结晶过程: 匀晶转变, 脱溶转变

室温显微组织: $(\alpha + \beta_{II})$

成分位于 f 和 m 之间的所有合金, 平衡结晶过程与上述合金相似, 其显微组织也由 $\alpha + \beta_{II}$ 组成, 只是两相的相对含量不同。

(2) 共晶合金(合金 II)

结晶过程: 共晶转变, 脱溶转变

室温显微组织: $(\alpha + \beta + \alpha_{II} + \beta_{II})$

共晶组织中 α 、 β 相的相对含量: $w_{\alpha m} = \frac{en}{mn} \times 100\% \approx 45.4\%$ $w_{\beta n} = \frac{me}{mn} \times 100\% \approx 54.6\%$

(3) 亚共晶合金(合金 III)

结晶过程: 匀晶转变, 共晶转变, 脱溶转变

室温显微组织: $\alpha + (\alpha + \beta) + \beta_{II}$

初生相 α 和共晶组织 $(\alpha + \beta)$ 的相对含量:

$$w_{\alpha} = \frac{e2}{me} \times 100\% \quad w_L = \frac{m2}{me_n} \times 100\%$$

成分位于 m 和 e 之间的所有合金, 平衡结晶过程与上述合金相似, 其组织组成物相同, 只是相对含量不同。

(4) 过共晶合金(合金 IV)

结晶过程: 匀晶转变, 共晶转变, 脱溶转变

室温显微组织: $\beta + (\alpha + \beta) + \alpha_{II}$

初生相 β 和共晶组织 $(\alpha + \beta)$ 的相对含量: $w_{\beta} = \frac{e2}{en} \times 100\% \quad w_L = \frac{2n}{en} \times 100\%$

成分位于 e 和 n 之间的所有合金, 平衡结晶过程与上述合金相似, 其组织组成物相同, 只是相对含量不同。

3. 共晶系合金的非平衡结晶及其组织

(1) 伪共晶:

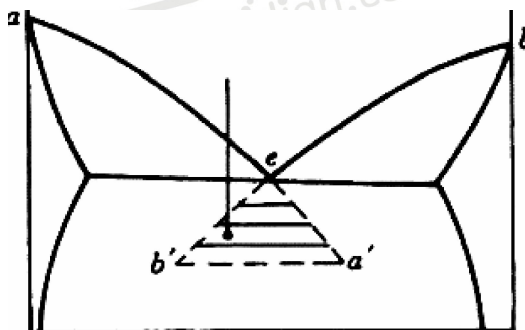
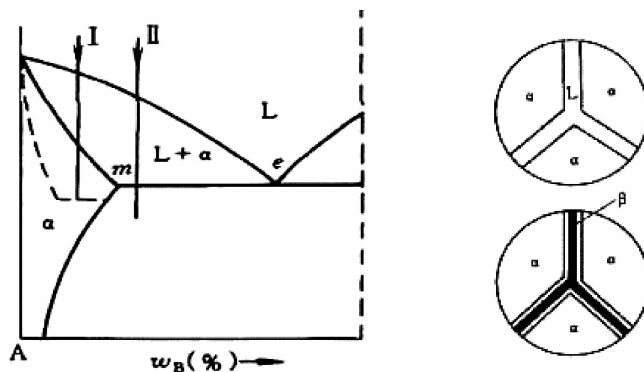


图 5-28 伪共晶区

在不平衡结晶条件下,成分在共晶点附近的亚共晶或过共晶合金,也可能得到全部的共晶组织,这种非共晶成分的合金所得到的完全共晶组织称为伪共晶组织。

(2) 离异共晶:

在非平衡条件下,成分位于共晶线两端点外附近的合金,由于先共晶数量较多而共晶组织数量很少,共晶组织中与先共晶相相同的那一相,会依附于先共晶相上生长,剩下的另一相则单独存在于晶界处,从而使共晶组织的特征消失,这种两相分离的共晶称为离异共晶。



4. 根据共晶相图判断合金的性能

(1) 判断合金的力学性能和物理性能

合金的强度、硬度和导电性与成分呈直线关系。但当共晶组织细密,且在不平衡结晶出现伪共晶时,其强度和硬度将偏离直线关系而出现峰值。

(2) 判断合金的铸造性能

共晶成分的合金熔点低,而且是恒温凝固,故流动性好,凝固后容易形成集中缩孔,而分散缩孔(缩松)少,热裂倾向也小

本节名校真题

一、名词解释:

1. 离异共晶;(2011 年华南理工大学)
2. 伪共晶组织;(2009 年青岛科技大学)

二、选择题:(2010 年华南理工大学)

二元相图中,当有二次相析出时,固溶线表现为()。

- A. 垂线 B. 水平线 C. 斜线

三、问答题:

何谓共晶反应? 包晶反应? 试用相律分析说明只有在共晶点何包晶点时才能三相共存。(2005 年中山大学)

四、绘图并计算(2012 年青岛科技大学)

根据下列条件画出一个二元系共晶相图。两组元 A 何 B 的熔点分别是 1000°C 何 700°C , 含 $W_B =$

0.25 的合金在 500°C 结晶完成,它的平衡组织由 73.3% 的先共晶 α 何 26.7% 的 $(\alpha + \beta)$ 共晶组成,并且此合金的 α 总量为 50%。

第五节 包晶相图及其合金的结晶

本节常见题型有名词解释、填空题和选择题以及以原理分析为内容的简答题。

※本章复习要点

1. 熟悉包晶相图和包晶转变
2. 掌握包晶相图合金的平衡结晶过程,结晶后的组织状态,相的相对量计算,以及组织与性能的影响规律。
3. 掌握包晶相图合金的不平衡结晶过程,结晶后的组织特点。

※本节重要考点

1. 重点掌握:亚包晶合金、包晶合金、过包晶合金的平衡结晶过程,结晶后的组织状态,相组成物和组织组成物的相对量计算。
2. 掌握:包晶相图合金的不平衡结晶过程,结晶后的组织特点。
3. 了解包晶合金相图的应用。

※本节重要概念

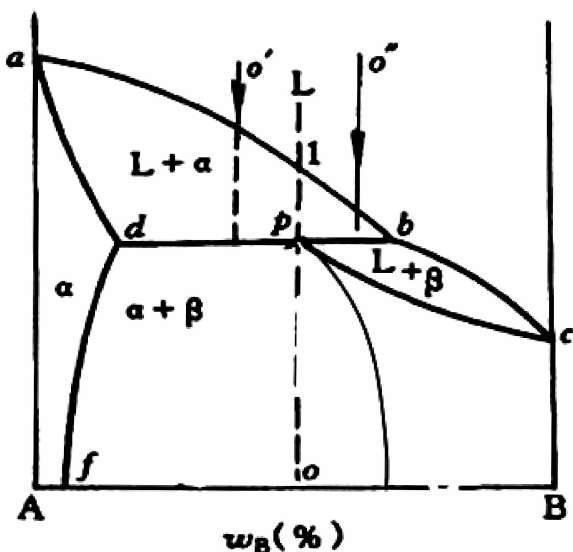
包晶转变,异常包晶相

※考点精讲

1. 包晶相图与包晶转变

(1) 包晶相图:两组元在液态无限互溶,在固态有限互溶或完全不溶,且冷却时发生包晶反应的相图。

相图分析



点:最大溶解度点;包晶点

线:液相线,固相线,溶解度曲线;

包晶反应线

区:3个单相区;3个两相共存区;

1个三相共存区(水平线)

(2)包晶转变:在恒温下由一定成分的液相与一定成分的固相作用,形成一个一定成分的固相的转变过程.

$$\text{反应式: } w_L = \frac{2n}{en} \times 100\%$$

发生包晶反应的温度称为包晶温度. 包晶反应的产物称为包晶组织. p点称为包晶成分对应于p点的合金称为包晶合金. 成分位于dp的合金称为亚包晶合金成分位于pb的合金称为过共晶合金.

2. 典型合金的平衡结晶及其组织

(1)包晶点(o点)成分合金的结晶

结晶过程:匀晶转变、包晶转变(转变结束时, L和 α 均无剩余)、脱溶转变

室温显微组织:($\beta + \alpha_{II}$)

包晶转变开始时, L和 α 的相对量为:

$$W_L \% = dp/db \times 100\% \quad W_{\alpha} \% = pb/db \times 100\%$$

(2)成分在dp之间合金的结晶

结晶过程:匀晶转变、包晶转变(转变结束时, α 剩余)、脱溶转变

室温显微组织: $\alpha + \beta + \alpha_{II} + \beta_{II}$

成分位于d和p之间的所有合金,平衡结晶过程与上述合金相似,其组织组成相同,只是相对含量不同.

(3)成分在pb之间合金的结晶

结晶过程:匀晶转变、包晶转变(转变结束时, L 剩余)、匀晶转变、脱溶转变

室温显微组织: $\beta + \alpha_{II}$

成分位于p和b之间的所有合金,平衡结晶过程与上述合金相似,其组织组成物相同,只是相对含量不同.

3. 包晶系合金的非平衡结晶组织

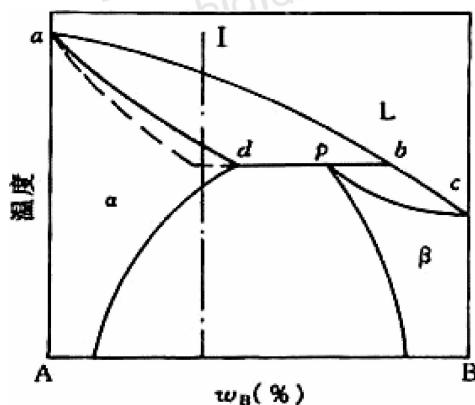


图 5-38 快冷而可能发生的包晶反应示意图

(1) 由于冷速较快,包晶转变被抑制,剩余的液相在低于包晶温度下,直接转变为 β 相,从而导致:

- ①部分 α 相被保留下来;
- ② β 相的成分很不均匀,即包晶偏析;

(2) 位于 d 点左侧的合金,在不平衡条件下,由于固相平均成分线的向下偏移,使最后凝固的液相可能发生包晶反应,形成一些不应出现的 β 相(异常包晶相)。

4. 包晶转变的实际应用

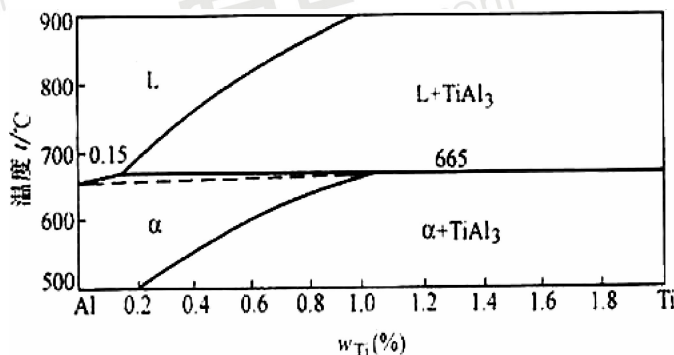


图 3-56 Al-Ti 相图一角

(1) 合金设计——在轴承合金中的应用

- ①结晶出硬的化合物
- ② 通过包晶反应形成软的固溶体,并把硬的化合物质点包围起来,从而得到在软的基体上分布着硬的化合物质点的组织。

(2) 细化晶粒——铝合金中添加少量钛

①结晶出的细小而弥散的初晶 TiAl_3 , ② $\text{L} + \text{TiAl}_3 \rightarrow \alpha$, α 相依附于 TiAl_3 上形核并长大, TiAl_3 起促进非均匀形核作用。

本节名校真题

一、填空题：

在一定温度下，由一定成分的固相与一定成分的液相作用，形成另一个一定成分固相的过程称为_____转变。(2011 青岛科技大学)

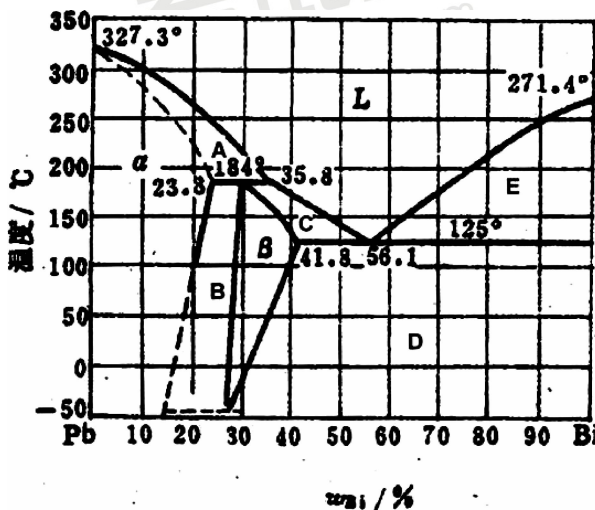
二、何谓共晶反应？包晶反应？试用相律分析说明只有在共晶点何包晶点时才能三相共存。

(2005 年中山大学)

三、画图说明包晶转变在轴承合金中的作用。(2012 年减速大学大学)

二、问答题：(2010 年华南理工大学)

根据 Pb - Bi 相图回答问题：



(1) 写出 A、B、C、D、E 五个相区的相的名称。

(2) 写出相图中两条水平线的相变反应，并指出反应类型。

(3) 设 X 合金平衡凝固完毕时的相组成物为 β 和 (Bi)，其中相 β 占 80%，则 X 合金中 Bi 组元的含量是多少？

(4) 设 Y 合金平衡凝固完毕时的组织为初晶 + [β + (Bi)] 共晶，且初晶与共晶的百分含量相等，则此合金中 Pb 组元的含量是多少？

(5) Pb - 30% Bi 合金非平衡凝固后室温下组织与平衡凝固组织有何不同。

第四章 铁碳合金

第一节 铁碳合金的基本相与 Fe - Fe₃C 相图

※本章复习要点

熟悉铁碳合金的基本相以及铁碳相图中各点、线、区的含义,熟悉三个恒温转变的反应式。

※本节重要考点

1. 重点掌握:三个恒温转变的反应式。
2. 理解:铁碳合金的基本相以及铁碳相图中各点、线、区的含义。

※本节重要概念

同素异构转变,奥氏体,铁素体,渗碳体。

※考点精讲

1. 纯铁的同素异构转变

1538℃: $L \rightarrow \delta - Fe$ (bcc 结构)

1394℃: $\delta - Fe \rightarrow \gamma - Fe$ (fcc 结构)

912℃: $\gamma - Fe \rightarrow \alpha - Fe$ (bcc 结构)

2. 铁碳合金的基本相

(1) 高温铁素体:碳溶解于高温 $\delta - Fe$ 中的间隙固溶体,体心立方结构,塑性好,表示为 δ 。

(2) 铁素体:碳溶解于 $\alpha - Fe$ 中的间隙固溶体,体心立方结构,塑性好,铁磁性,表示为 F 或 α 。

(3) 奥氏体:碳溶解于 $\gamma - Fe$ 中的间隙固溶体,面心立方结构,塑性好,顺磁性,表示为 A 或 γ 。

(4) 渗碳体 (Fe_3C):铁与碳形成的间隙化合物,正交晶系,含碳量 6.69%,硬而脆,230℃ 以下具有一定铁磁性

3. Fe - Fe₃C 相图分析

(1) 点、线、区

1) 点:14 个。纯铁的同素异构转变点,包晶点,共晶点,共析点,固溶体的最大溶解度点。

2) 线:液相线,固相线,包晶线,共晶线,共析线,匀析线,溶解度变化曲线

3) 区:5 个单相区,7 个两相区,3 个三相区。

(2) 三个重要转变

① 包晶转变 (水平线 HJB): $\delta_{0.09} + L_{0.53} = \gamma_{0.17}$

② 共晶转变 (水平线 ECF): $L_{4.3} = \gamma_{2.11} + Fe_3C$ 反应产物称为莱氏体,以 L_d 表示。凡是含碳量在

2.11% - 6.69% 范围内的合金,都要发生共晶转变

③共析转变(水平线 PSK): $\gamma_{0.77} = \alpha_{0.0218} + \text{Fe}_3\text{C}$ 反应产物称为珠光体,以 P 表示。凡是含碳量在 0.0218% - 2.11% 范围内的合金,都要发生共析转变

(3) 三条重要的特性曲线

1) GS 线: GS 线又称为 A₃ 线,它是冷却过程中由奥氏体析出铁素体的开始线。

2) ES 线: ES 线是碳在奥氏体中的溶解度曲线。当温度低于此曲线时,从奥氏体中析出二次渗碳体,用 $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ 表示,因此该曲线又称二次渗碳体的开始析出线。ES 线也叫 Ac_{m} 线。

3) PQ 线: PQ 线是碳在铁素体中的溶解度曲线。当温度低于此曲线时,就要从铁素体中析出三次渗碳体,用 $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$ 表示,因此该曲线又称三次渗碳体的开始析出线。

本节名校真题

一、填空题:

1. 铁具有三种同素异晶状态,其中 $\gamma - \text{Fe}$ 为_____晶格, $\alpha - \text{Fe}$ 为_____晶格。(2012 华南理工大学)

2. $\gamma - \text{Fe}$ 的间隙比_____的大,奥氏体中碳原子位于_____间隙。(2011 华南理工大学)

3. 在 $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$ 相图中,存在三个恒温转变,分别是_____,_____和_____。(2011 华南理工大学)

4. 碳在 $\alpha - \text{Fe}$ 中的间隙固溶体称为_____,它具有_____晶体结构,在_____℃时碳的最大溶解度为_____%。(2011 年河北工业大学)

二、选择题:

1. 奥氏体是_____。(2013 哈尔滨工业大学)

A. 碳在 $\gamma - \text{Fe}$ 中的间隙固溶体

B. 碳在 $\alpha - \text{Fe}$ 中的间隙固溶体

C. 碳在 $\gamma - \text{Fe}$ 中的置换固溶体

2. 渗碳体是_____种_____。(2013 哈尔滨工业大学)

A. 间隙相

B. 间隙化合物

C. 正常价化合物

3. 室温平衡状态下,钢中的碳绝大部分是以_____形式存在于组织中。(2011 年华南理工大学)

A. 铁素体

B. 渗碳体

C. 石墨碳

三、判断题:(2012 年华南理工大学)

1. 铁素体的溶碳能力比奥氏体大得多

第二节 铁碳合金的平衡结晶过程及其组织

本节常见题型以分值稍大的问答题、综合题为主,也会出现名词解释、选择、填空题等题型。

※本章复习要点

在熟悉铁碳相图各点、线的物理意义的基础上,掌握 7 种典型成分铁碳合金的结晶过程、室温组

织状态,利用杠杆定律计算相组成物和组织组成物的相对量计算。

1. 重点掌握:掌握 7 种典型成分铁碳合金的结晶过程、室温组织状态。
2. 掌握:利用杠杆定律计算相组成物和组织组成物的相对量计算。

※ 本节重要概念

二次渗碳体,珠光体,莱氏体。

※ 考点精讲

1. 铁碳合金的分类

(1) 工业纯铁: $<0.0248\%$

(2) 碳钢:亚共析钢; $0.0218\% - 0.77\%$

共析钢; 0.77%

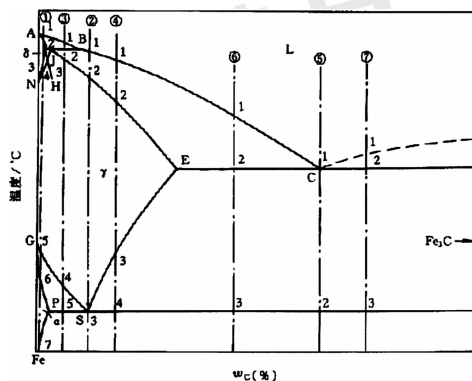
过共析钢; $0.77\% - 2.11\%$

(3) 铸铁:亚共晶白口铸铁; $2.11\% - 4.3\%$

共晶白口铸铁; 4.3%

过共晶白口铸铁; $4.3\% - 6.69\%$

2. 工业纯铁的平衡结晶过程及其组织



(1) 平衡结晶过程

$T_1 \sim T_2: L \rightarrow \delta$

$T_2 \sim T_3: \delta$

$T_3 \sim T_4: \delta \rightarrow \gamma$

$T_3 \sim T_4: \gamma$

$T_5 \sim T_6: \gamma \rightarrow \alpha$

$T_6 \sim T_7: \alpha$

T_7 以下: $\alpha \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$

(2) 室温组织: $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$

3. 共析钢的平衡结晶过程及其组织

(1) 平衡结晶过程

$T_1 \sim T_2: L \rightarrow \gamma$

$T_2 \sim T_3: \gamma$

$727^\circ\text{C}: \gamma_{0.77} \rightarrow (\alpha_{0.0218} + \text{Fe}_3\text{C}) \text{ 或 } \gamma \rightarrow \text{P}$

(2) 室温组织: 片层状珠光体 P

4. 亚共析钢的平衡结晶过程及其组织

(1) 平衡结晶过程

$T_1 \sim T_2: L \rightarrow \delta$

$T_2: L + \delta \rightarrow \gamma$

$T_2 \sim T_3: L \rightarrow \gamma$

$T_3 \sim T_4: \gamma$

$T_4 \sim T_5: \gamma \rightarrow \alpha$

$T_5 \text{ 或 } 727^\circ\text{C}: \gamma_{0.77} \rightarrow \text{P}$

727°C 以下: $\alpha \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$, 但析出量很少, 可以忽略

(2) 室温组织: $\alpha + \text{P}$, 即由先共析铁素体和珠光体组成。由于放大倍数较小, 不能清晰观察到珠光体的片层特征。

(3) 组织组成物和相组成物的相对量的计算

1) 组织组成物的相对量:

$$W_\alpha = (0.77 - 0.40) / (0.77 - 0.0218) \times 100\% = 49.45\%$$

$$W_P = (0.40 - 0.0218) / (0.77 - 0.0218) \times 100\% = 50.55\%$$

2) 相组成物的相对量:

$$W_\alpha = (6.69 - 0.4) / (6.69 - 0.001) \times 100\% = 94\%; W_{\text{Fe}_3\text{C}} = 100\% - 94\% = 6\%$$

5. 过共析钢的平衡结晶过程及其组织

(1) 平衡结晶过程

$T_1 \sim T_2: L \rightarrow \gamma$

$T_2 \sim T_3: \gamma$

$T_3 \sim T_4: \gamma \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$

$T_4 \text{ 或 } 727^\circ\text{C}: \gamma_{0.77} \rightarrow \text{P}$

727°C 以下: $\alpha \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$, 但析出量很少, 可以忽略

(2) 室温组织: $\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$

二次渗碳体沿奥氏体晶界呈网状分布。

(3) 过共析钢中二次渗碳体的最大含量计算

$$W_{\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}} = (2.11 - 0.77) / (6.69 - 0.77) \times 100\% = 22.6\%$$

6. 共晶白口铸铁的平衡结晶过程及其组织

(1) 平衡结晶过程

$1148^\circ\text{C}: L_{4.3} \rightarrow (\gamma_{2.11} + \text{Fe}_3\text{C}) \text{ 或 } L \rightarrow L_d$

1148℃ - 727℃: $\gamma_{2.11} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$

727℃: $\gamma_{0.77} \rightarrow \text{P}$

(2) 室温显微组织形貌: $\text{Ld}' = (\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}} + \text{Fe}_3\text{C})$

二次渗碳体依附在共晶渗碳体上析出并长大,难以分辨。珠光体分布在共晶渗碳体的基体上。

7. 亚共晶白口铸铁的平衡结晶过程及其组织

(1) 平衡结晶过程

$T_1 \sim T_2$: $\text{L} \rightarrow \gamma$

T_2 : $\text{L}_{4.3} \rightarrow (\gamma_{2.11} + \text{Fe}_3\text{C})$ 或 $\text{L} \rightarrow \text{L}_d$

$T_2 \sim T_3$: $\gamma_{2.11} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$

T_3 或 727℃: $\gamma_{0.77} \rightarrow \text{P}$

(2) 室温组织形貌: $\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}} + \text{L}_d'$ 大块黑色部分是珠光体,二次渗碳体与共晶渗碳体连成一片,难以分辨。

8. 过共晶白口铸铁的平衡结晶过程及其组织

(1) 平衡结晶过程

$T_1 \sim T_2$: $\text{L} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$

T_2 : $\text{L}_{4.3} \rightarrow (\gamma_{2.11} + \text{Fe}_3\text{C})$ 或 $\text{L} \rightarrow \text{L}_d$

$T_2 \sim T_3$: $\gamma_{2.11} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$

T_3 或 727℃: $\gamma_{0.77} \rightarrow \text{P}$

室温显微组织形貌: $\text{Fe}_3\text{C} + \text{L}_d$ 白色板条状先共晶渗碳体(或一次渗碳体)分布在共晶渗碳体上

本节名校真题

一、名词解释:二次渗碳体(2010 年河北工业大学)

二、填空题:

在 Fe - C 相图中,渗碳体的存在形式包括____、____、____、____、____五
种。(2011 青岛科技大学)

三、选择题:(2010 华南理工大学)

1. 一次渗碳体、二次渗碳体、三次渗碳体的_____。

- A. 晶体结构不同,组织形态相同。
- B. 晶体结构相同,组织形态不同
- C. 晶体结构与组织形态都不同

四、简答题:(2010 年华南理工大学)

什么是过共析钢? 结晶过程如何? 过共析钢平衡组织中渗碳体最大含量为多少?

五、问答题:(2011 年青岛科技大学)

绘出 Fe - Fe₃C 相图并完成下列问题。

(1) 在相图中标出各区的组织组成物;

(2)分析 55 钢和 T12 钢的平衡冷却过程,分别指出两合金室温下的相组成物和组织组成物。

(3)计算二次渗碳体及三次渗碳体的最大

六、问答题:

(1)画出 Fe - Fe₃C 相图。填写各区的组织组成物。

(2)比较相图中各种固溶体异同点。

(3)画出含碳量为 3.0% 铁碳合金冷却过程组织示意图,求出其室温组织珠光体中渗碳体相对量。(2012 年江苏大学)

七、试根据铁碳相图说明成分为 C = 0.02% 的钢,由低温到高温过程中要产生几种相变。并计算 C = 0.45% 钢在室温下珠光体组织中 α 相的相对含量(2010 年河北工业大学)

第三节 含碳量对铁碳合金平衡组织和性能的影响

本节常见题型以选择、填空题为主,也会出现分值稍大的问答题。

※本章复习要点

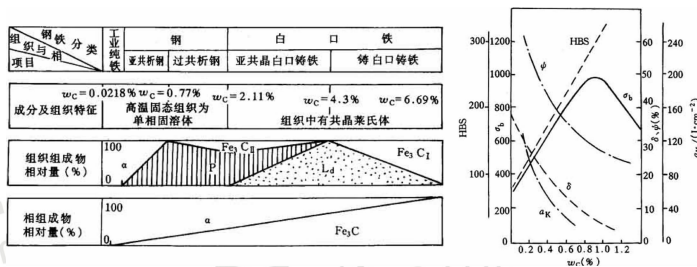
掌握铁碳合金的组织组成物、力学性能和工艺性能随含碳量变化的规律。

1. 重点掌握:铁碳合金的组织组成物、力学性能和工艺性能随含碳量变化的规律。

2. 理解:熟悉铁素体、渗碳体、珠光体、莱氏体等基本组成物的力学性能特性以及合金的加工工艺性能的指标。

※考点精讲

1. 含碳量对铁碳合金平衡组织的影响



2. 含碳量对铁碳合金力学性能的影响

合金的塑性变形主要由铁素体提供,含碳量增加,铁素体含量减少,塑性降低

合金的硬度主要由渗碳体提供,含碳量增加,渗碳体含量增加,硬度提高。

网状二次渗碳体导致合金脆性增加。

3. 含碳量对铁碳合金工艺性能的影响

锻造性:单相奥氏体区,塑性好,变形阻力小,锻造性好,但应避免过热。

冷塑变加工性: < 0.25%,塑性好,变形阻力小。

铸造性:4.3%附近,结晶温度区间小,流动性好“逐层凝固”方式,缩颈、热裂倾向小枝晶偏析性:固相线与液相线的水平距离和垂直距离越大,枝晶偏析越严重。4.3%附近的合金,成分偏析倾向小。

切削加工性能:低碳钢的硬度低,易粘刀,切屑不易折断,影响表面粗糙度,因此切削加工性不好;高碳钢的硬度大,刀具磨损严重,因此切削加工性也不好。中碳钢,塑性和硬度适中,切削加工性好。

本节名校真题

一、选择题:

1. 在室温平衡条件下,碳钢的含碳量超过 0.9% 后,随着含碳量增加,其_____. (2013 哈尔滨工业大学)

- A. 强度、塑性均下降 B. 硬度升高、塑性下降 C. 强度、塑性均不确定

2. 平衡结晶时,凡含碳量_____的铁碳合金,自 1148℃ 冷至 727℃ 时,均从奥氏体中析出二次渗碳体。(2011 年华南理工大学)

- A. 0.0218% - 6.69% B. 0.77% - 2.11% C. 0.77% - 6.69%

3. 铸铁与钢的区别在于有无_____。(2013 哈尔滨工业大学)

- A. 渗碳体 B. 珠光体 C. 莱氏体

第五章 三元合金相图

第一节 浓度三角形和三元系平衡相的定量法则

本节常见题型以名词解释、选择、判断、填空题为主。

※本章复习要点

学会确定成分三角形内某点的成分或根据已知的成分在成分三角形内标注成分点,认识成分三角形中两条特殊线上的成分特点,掌握直线法则、杠杆定律和重心法则的实质和适用条件。

※本节重要考点

1. 重点掌握:掌握直线法则、杠杆定律和重心法则的实质和适用条件。
2. 掌握:确定成分三角形内某点的成分或根据已知的成分在成分三角形内标注成分点。
3. 理解:成分三角形中两条特殊线上的成分特点。

※考点精讲

1. 浓度三角形

三元合金的成分通常用三角形表示,这个三角形叫成分三角形或浓度三角形。

等边三角形表示合金成分的方法 取一等边三角形 ABC,三角形的三个顶点 A,B,C 分别表示三个组元,三条边分别表示三个二元系 A-B、B-C 和 C-A 的成分,三角形内任一点则代表一定成分的三元合金。

下面以三角形内任一点 O 为为例,

说明合金成分的求法。

- 1) 过 O 作 A 角对边的平行线
- 2) 求平行线与 A 的成分坐标的截距,即得组元 A 的含量 $W_A\%$
- 3) 同理求组元 B、C 的含量

2. 浓度三角形中特殊线的成分特点

(1) 平行于浓度三角形任一边的直线

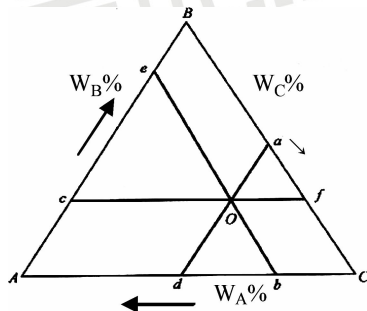
位于该线上的合金,所含的对应顶点所代表的组元的含量为一定值,即为 $W_B\%$ 。

(2) 从浓度三角形的一个顶点到对边的任意直线

位于该线上的合金,所含另两个顶点所代表的组元含量的的比值恒定。

3. 直线法则和杠杆定律

(1) 直线法则(共线法则):



在一定温度下,三元合金两相平衡时,合金的成分点和两个平衡相的成分点必然位于成分三角形内的同一条直线上,且合金成分点位于两个平衡相的成分点之间。

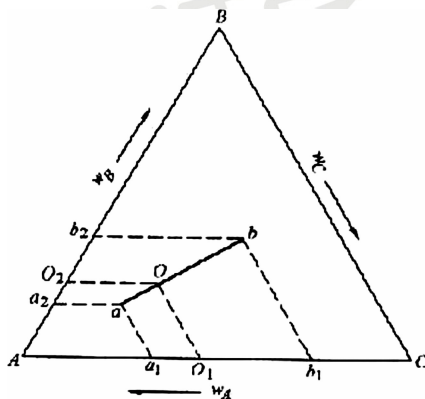
推论:当一个成分为 O 合金的液相在结晶过程中,若析出 α 相成分不变,则剩余液相的成分一定沿 α 相成分点与 O 点的连线延长线变化。

(2) 杠杆定律:

$$\frac{w_{\alpha}}{w_{\beta}} = \frac{Ob}{Oa} = \frac{O_2b_2}{O_2a_2} = \frac{O_1b_1}{O_1a_1}$$

4. 重心法则

在一定温度下,三元合金三相平衡时,合金的成分点为三个平衡相的成分点组成的三角形的质量重心。



设 α, β, γ 分别为 D, E, F 成分点, 则

$$w_{\alpha} = \frac{Nd}{Dd} \times 100\% \quad w_{\beta} = \frac{Ne}{Ee} \times 100\% \quad w_{\gamma} = \frac{Nf}{Ff} \times 100\%$$

本节名校真题

一、名词解释:(2012 江苏大学)

三元相图直线法则

二、选择题:(2011 华南理工大学)

在 A-B-C 三元系中,如合金 O 在某一温度处于 α, β 两相平衡,而且 O、 α, β 的含 A 量分别为 30%、60%、10%,则 α, β 两相重量比满足 $W_{\alpha}/W_{\beta} = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

第二节 三元均晶相图

本节常见题型以选择、填空题为主。

※本章复习要点

灵活运用三元匀晶相图的投影图、垂直截面图和等温截面图分析三元匀晶合金随温度变化发生的相平衡转变及形成的组织组成物。

※本节重要考点

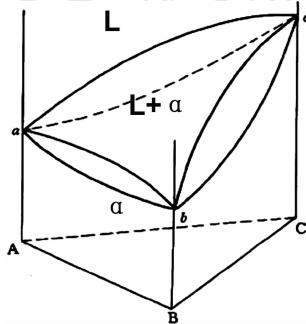
1. 重点掌握:三元匀晶相图的投影图、垂直截面图和等温截面图分析三元匀晶合金随温度变化发生的相平衡转变及形成的组织组成物。
2. 掌握:运用杠杆定律计算平衡相的相对量。
3. 理解:三元系两相平衡转变特点、成分变化规律。

※考点精讲

1. 三元匀晶相图分析

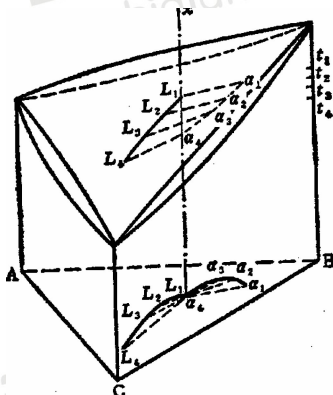
(1) 点; a, b, c 三个纯组元的熔点。

(2) 面;液相面(凸面),由液相线演化而来,其上为液相;固相面(凹面),由固相线演化而来,其下为固相。



(3) 区; L 相区, α 固溶体区, $L + \alpha$ 两相区

2. 三元固溶体合金的结晶过程及组织



当合金 O 自液态缓慢冷却至 t_1 温度 (与液相面相交) 时, 开始从液相中结晶出 α 固溶体, 此时液相的成分 L_1 即为合金成分, 而固相的成分为固相面上的某一点 α_1 。当温度缓慢降至 t_2 时, 液相数量不断减少, 固相数量不断增多, 此时固相的成分由 α_1 沿固相面移至 α_2 点, 液相的成分由 L_1 点沿液相面移至 L_2 点。当温度缓慢降至 t_3 时, 液相数量更少, 固相数量更多, 此时固相的成分由 α_2 点沿固相面移至 α_3 点, 液相的成分由 L_2 点沿液相面移至 L_3 点。当温度缓慢降至 t_4 时, 最后一滴液相结晶成固溶体, 结晶终了, 得到与原合金成分相同的 α 固溶体。由直线法可以确定, 合金的成分必然位于液相和固相的成分点的连线上。在 t_1 时, 其连接线为 $L_1\alpha_1$; 在 t_2 时, 其连接线为 $L_2\alpha_2$ 。以此类推, 在 t_3 时为 $L_3\alpha_3$; 在结晶终了的 t_4 温度为 $L_4\alpha_4$, 此时固相的成分即为合金的成分。这些连接线虽然都是水平线, 但是在合金的结晶过程中, 液相的成分和固相的成分分别沿着液相面和固相面上的 $L_1L_2L_3L_4$ 和 $\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4$ 空间曲线变化, 这两条曲线既不都处于同一垂直平面上, 液相也不都处于同一水平平面上, 它们在成分三角形上的投影很像一只蝴蝶, 所以称之为固溶体合金结晶过程的蝴蝶形规律。

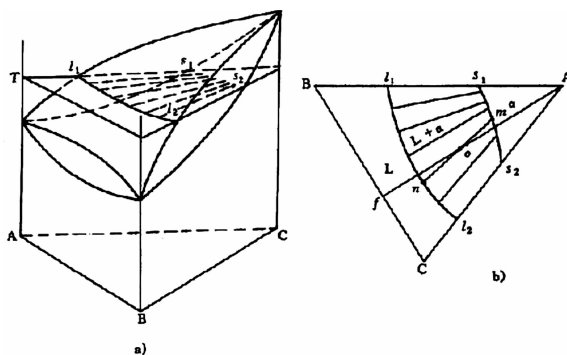
3. 等温截面 (水平截面)

作用之一; 可以确定三元系合金在某一温度下所处的状态。

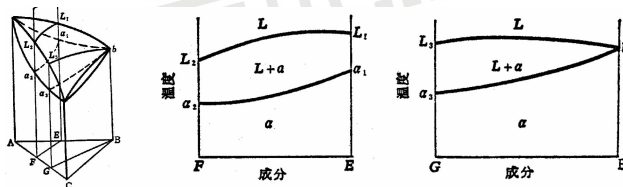
图 b 表示 ABC 三元系在 t_1 温度的等温截面, 它相当于在立体模型中插入一个 t_1 温度的水平面, 该面与液相面与固相面分别相截于 L_1L_2 和 $\alpha_1\alpha_2$ (图 a), 将这两条投影到成分三角形上, 就得到图 b 所示的等温截面图。

可见, 整个截面被分为三个不同的相区: α 相区, $L + \alpha$ 两相区和 L 相区。凡是成分位于 $B\alpha_1\alpha_2$ 区内的合金均已结晶终了, 其相组成为单相 α 固溶体; 成分位于 AL_1L_2C 区内的合金均尚未结晶, 处于液相状态; 成分位于 $L_1L_2\alpha_1\alpha_2$ 区内的合金处于液固两相平衡状态。曲线 L_1L_2 称为液相等温线, 或称液相线, 成分点位于这条曲线上的合金在 t_1 温度均刚刚开始凝固。曲线 $\alpha_1\alpha_2$ 为固相等温线, 或称固相线, 成分点位于这条曲线上的合金在 t_1 温度均凝固终了。

作用之二: 可以确定三元系合金在某一温度下, 两平衡相的成分。



在等温截面的两相区内, 根据相律, 系统的自由度为 2, 温度固定后, 还剩一个自由度。这就是说, 只有一个平衡相的成分可以独立改变, 另一个平衡相的成分必须随之改变。如果用试验方法测出了固相成分为 m , 则根据直线法则, 两平衡线成分点的连接线必定通过合金的成分点 o , 显然, mo 延长线与 L_1L_2 的交点 n 即是液相的成分点。



作用之三:可以确定三元系合金在某一温度下,两平衡相的相对含量。

4. 变温截面(垂直截面)

(1)垂直截面的形成垂直截面有两种,一种是通过成分三角形的某一顶点所作的截面,分别与液相面与固相面相交,得到两条交线,将交线绘于该截面上,即得到垂直截面。

另一种是平行于成分三角形的一边所作的垂直截面。

(2)垂直截面的形状和意义:

① 与二元相图类似,纵坐标表示温度,横坐标表示合金的成分。

② 垂直截面图上均有两条曲线,其中上面那条曲线为液相线,下面的曲线为固相线。

③ L , $L + \alpha$, α 分别表示液相区,液固两相区和固相区。

(3)垂直截面作用

利用垂直截面图,可以确定合金在不同温度下所处的状态,以及结晶或加热过程的相变。

当合金 O 缓慢冷却至 t_1 时,开始从液相中结晶出 α 固溶体,温度继续下降,结晶出来的 α 相增多,当温度降至 t_2 时,液相完全结晶成 α 相, t_2 为结晶终了温度。

垂直截面的局限性:

① 液、固相线不一定相交;成分轴的两端也不一定是纯组元;

② 截取所得的两条交线(分别为液相线和固相线),不能应用直线法则确定某一温度下两平衡相的成分,也不能运用杠杆定律来计算两相的相对含量。

5. 投影图——等温线投影图

将一系列等温截面中的相交线都投影到成分三角形中,在每一条上都注明相应的温度. 利用它可以确定合金的开始结晶温度和结晶终了温度。从图可以看出,成分为 O 的合金在 $t_4 < t < t_3$ 的温度开始凝固,在 $t_6 < t < t_5$ 的温度结晶终了。

本节名校真题

一、填空题:

三元匀晶固溶体凝固,液相和固相成分分别沿着_____和_____上的空间曲线变化。这两条线在_____上的投影称之为_____规律。(2012 江苏大学)

二选择题:(2010 华南理工大学)

1. 在三元合金中,如果合金 O 在某一温度处于两相平衡,这两个相的成分点分别为 a 和 b , 则 O 、 a 、 b 三点一定在一条直线上,且_____。

- A. O 点位于 a、b 两点之间
- B. O 点位于 a、b 的延长线上
- C. O 点位于 b、a 的延长线上

第三节 组元在固态下不溶的三元共晶相图

本节常见题型以选择、填空题为主,也会出现简答题、作图题等。

※本章复习要点

※本节重要考点

1. 重点掌握:运用三元共晶相图的投影图、垂直截面图和等温截面图分析三元共晶合金随温度变化发生的相平衡转变及形成的组织组成物。
2. 掌握:三元系两相平衡和三相平衡转变特点、成分变化规律及运用杠杆定律计算平衡相的相对量。
3. 理解:三元系四相平衡的三种类型。

※考点精讲

1. 立体相图分析

三组元在液态无限互溶,在固态几乎完全不溶解,并且其中任两个组元具有共晶转变,形成简单的三元共晶系,其立体模型如图。 t_A 、 t_B 、 t_C 分别为 A、B、C 三组元的熔点并且 $t_A > t_B > t_C$ 。图的三个侧面是三个二元共晶相图, E_1 、 E_2 、 E_3 分别为 A-B、B-C、C-A 的二元共晶点,并且 $t_{E_1} > t_{E_2} > t_{E_3}$

3 块液相面:

$tAE_1EE_3tA(L \rightarrow A)$, $tBE_2EE_1tB(L \rightarrow B)$, $tCE_3EE_2tC(L \rightarrow C)$

三条二元共晶线(3 块液相面的交线): E_1E 线($L \rightarrow A+B$)、 E_2E 线($L \rightarrow B+C$)、 E_3E 线($L \rightarrow A+C$)

二元共晶转变时,自由度等于 1,即结晶在一定的温度范围内进行,各个相的成分也随着温度的变化做相应地改变。

一个三元共晶点: $E(L_E \rightarrow A+B+C)$

二元共晶转变时,自由度等于 1,在恒温、恒成分下转变。

三元共晶反应面: $\Delta A_1B_1C_1$

相区分析

液相区:液相面以上空间

两相区:液相面以下,

二元共晶面以上

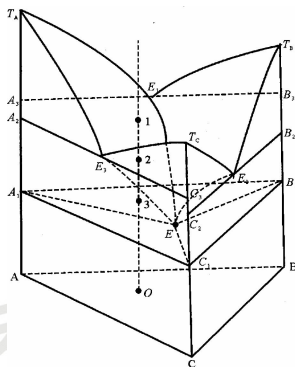
三相区:二元共晶面以下,

三元共晶面以上。

三元共晶面以下空间。

四相区: $\triangle A_1B_1C_1$ 平面内

2. 等温截面

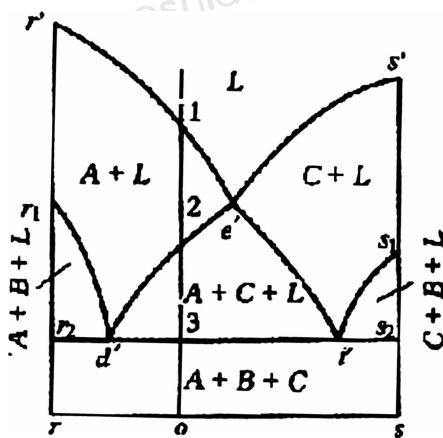


二相区的形状(温度低于液相面但高于二元共晶面):不规则三角形,曲线边是单相区与两相区的边界线,也是液相等温线 L_1L_2 ,或称液相线。两个平衡相的成分由其连接线确定,两个平衡相的相对量可以用杠杆定律计算。

三相区的形状:直边三角形;其中的边是三相区与两相区的边界线,顶点与单相区相接,分别表示该温度下三个平衡相的成分。三个平衡相的相对量可以用重心法则计算。

等温截面可以确定合金在该温度下的平衡相,即运用直线法则、杠杆定律和重心法可以确定在该温度下合金中各相的成分和相对含量。

3. 垂直截面



1) 通过平行于某一边 rs 的垂直截面

① 最上面的一条曲线是垂直平面与液相面的交线,该交线与其下方的其它交线(曲线或直线)所围成的区域就是两相平衡区。

② 水平线为四相区

③ 两相区以下、水平线以上的区域为三相区

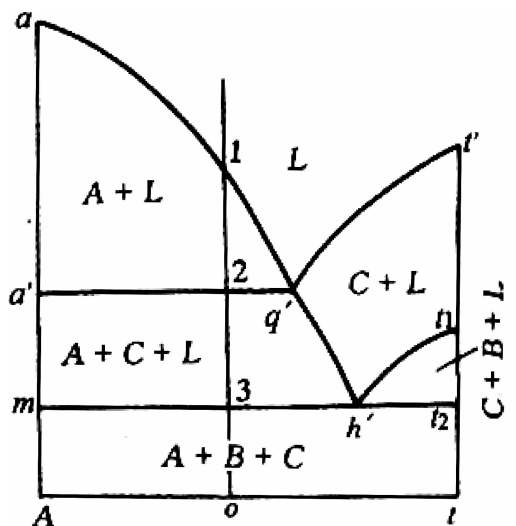
应用:分析合金的结晶过程,确定相变温度。

t_1 以上:液相,

温度 t_1 : $L \rightarrow A$ 开始

$t_1 - t_2$: $L \rightarrow A$ 不断进行

温度 t_2 : $L \rightarrow (A + C)$ 开始



温度 t_3 : $L \rightarrow (A + B + C)$, 直到液相消失. 室温组织: 初晶 A + 两相共晶体 (A + C) + 三相共晶体 (A + B + C)。

2) 通过成分三角形顶点的 At 垂直截面

温度 1 以上: 液相

温度 1: $L \rightarrow A$ 开始发生

温度 1 - 2: $L \rightarrow A$ 不断进行

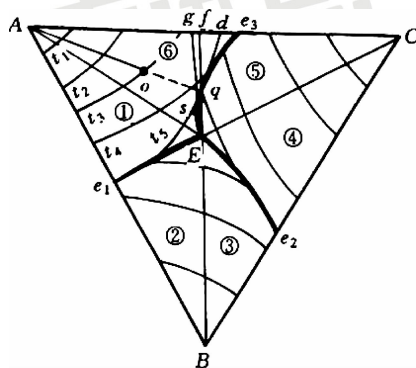
温度 2: $L \rightarrow A + C$ 开始发生

2 - 3: $L \rightarrow A + C$ 不断进行

3 - 3', $L \rightarrow A + B + C$ 恒温进行

室温组织: A + (A + C) + (A + B + C)

4. 投影图



利用投影图分析 O 点合金的凝固过程, 确定室温组织。

温度 t_3 : $L \rightarrow A$ 开始

温度 $t_3 - t_5$: $L \rightarrow A$ 不断进行

(液相的成分沿 AO 的延长线变化)

温度 t_5 : $L \rightarrow (A + C)$ 开始. (此时, 液相的成分变化至与 E_1E 线相交的 q)

温度 $t_5 - t_E$: $L \rightarrow (A + C)$ 不断进行 (液相成分沿 qE 线变化)

温度 t_E : $L \rightarrow (A + B + C)$ 开始 (液相的成分变化至 E 点),

恒温进行, 直至液相消失。

室温组织: $A + (A + C) + (A + B + C)$

1	初晶 A + 二相共晶 (A+B) + 三相共晶 (A+B+C)
2	初晶 B + 二相共晶 (A+B) + 三相共晶 (A+B+C)
3	初晶 B + 二相共晶 (B+C) + 三相共晶 (A+B+C)
4	初晶 C + 二相共晶 (B+C) + 三相共晶 (A+B+C)
5	初晶 C + 二相共晶 (A+C) + 三相共晶 (A+B+C)
6	初晶 A + 二相共晶 (A+C) + 三相共晶 (A+B+C)
AE 线	初晶 A + 三相共晶 (A+B+C)
BE 线	初晶 B + 三相共晶 (A+B+C)
CE 线	初晶 C + 三相共晶 (A+B+C)
e_1E 线	二相共晶 (A+B) + 三相共晶 (A+B+C)
e_2E 线	二相共晶 (B+C) + 三相共晶 (A+B+C)
e_3E 线	二相共晶 (A+C) + 三相共晶 (A+B+C)
E 点	三相共晶 (A+B+C)

三元系四相平衡的三种类型

四相平衡时, 自由度为 0, 为恒温反应. 如果四相中有一相为液相, 另三相为固相, 则四相平衡可能有三种类型:

共晶反应: $L \rightarrow \alpha + \beta + \gamma$

包共晶反应: $L + \alpha \rightarrow \beta + \gamma$

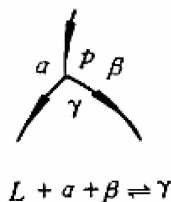
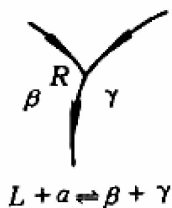
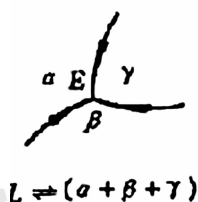
双包晶反应: $L + \alpha + \gamma \rightarrow \beta$

四个相平衡是四个成分点所构成的等温面。

在投影图上, 三条液相单变量线的箭头同时指向交点, 则在交点所对应的温度必然发生四相共晶转变。

在投影图上, 两条液相单变量线的箭头指向交点, 一条背离交点, 则在交点所对应的温度必然发生包共晶转变。

在投影图上, 一条液相单变量线的箭头指向交点, 两条背离交点, 则在交点所对应的温度必然发生双包晶转变。



本节名校真题

一、选择题：(2006 东南大学)

在三元系中出现两相平衡时,若要计算两相的百分数,则_____。

- A. 在垂直截面上运用杠杆定律计算
- B. 在水平截面上运用杠杆定律计算
- C. 在投影面上运用杠杆定律计算
- D. 在水平截面上运用重心法则计算

二、填空题：(2005 年江苏大学)

根据液相单变量线上箭头的指向,可以判断四相平衡转变类型。

当两条液相单变量线箭头指向交点,另一条液相单变量线箭头背离交点,则发生_____。

三、简答题

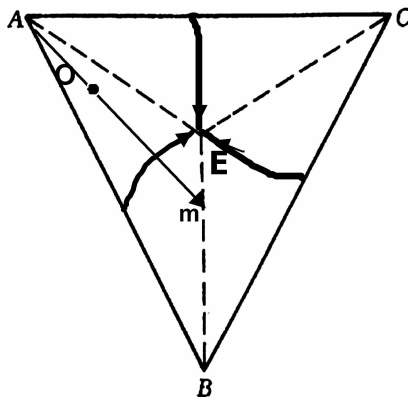
试用相律计算常压三元合金四相平衡的自由度。如果液相为其中

一个反应相,其它三个是固相,在降温过程中它们可能发生哪几类

转变? 写出其转变类型和对应的反应式。(2010 年华南理工大学)

四、如右图所示。三元合金 O 室温平衡组织是什么? 求出其相对量线段比。

(2012 江苏大学)



第六章 金属及合金的塑性变形

第一节 单晶体的塑性变形

本节常见题型有名词解释、选择、填空题,也有简答题、计算题和公式推导题。

※本章复习要点

1. 掌握塑性变形主要方式——滑移和孪生变形以及二者的主要相同点与不同点。
2. 理解施密特定律,能用位错理论解释晶体的滑移过程、滑移带和滑移线的形成,滑移系的特点
3. 能够运用变形理论解释单晶体的应力-应变曲线特征。

※本节重要考点

1. 重点掌握:掌握滑移和孪生变形的机制、晶体学特点以及二者的主要相同点与不同点。
2. 掌握:晶体的滑移过程、滑移带和滑移线的形成,滑移系的特点。
3. 理解:理解施密特定律。

※本节重要概念

滑移,孪生,滑移系,滑移带。

※考点精讲

1. 滑移与滑移带

(1) 滑移

滑移是不可恢复的剪切变形过程,即在切应力作用下晶体的一部分相对于另一部分沿着特定晶面(滑移面)上的特定方向(滑移方向)发生平移。滑移不改变晶体各部分的相对取向,即不在晶体内部引起位相差。

(2) 滑移带

在金相显微镜下可以观察到,在抛光的表面上出现许多相互平行的线条,这些线条称为滑移带。用电子显微镜观察观察,发现每条滑移带是由一组相互平行的小台阶所组成,这些小台阶称为滑移线。滑移带就是相互平行的一组小台阶的宏观反映,即一个大台阶。

2. 滑移系(统)

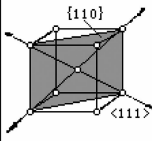
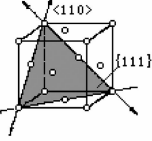
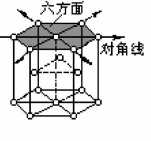
(1) 定义:滑移面和位于滑移面上滑移方向的组合. 表示为 $(hkl)[uvw]$ 。

滑移系的个数等于滑移面个数 \times 每个滑移面所具有的滑移方向的个数。

一般滑移系越多,塑性越好. 当然,塑性还与滑移面密排程度、滑移方向个数和同时开动滑移系数目有关

(2) 典型金属晶体的滑移系

三种典型金属晶格的滑移系

晶 格	体 心 立 方 晶 格		面 心 立 方 晶 格		密 排 六 方 晶 格	
滑 移 面	$\{110\}$ X4		$\{111\}$ X4		六方底面 X1	
滑 移 方 向	$\langle 111 \rangle$ X2		$\langle 110 \rangle$ X3		底 面 对 角 线 X3	
滑 移 系	6 X 2 = 12		4 X 3 = 12		1 X 3 = 3	

3. 滑移系启动的条件——Schmid 定律

(1) 分切应力:

晶体中的某个滑移系能否发生滑移,取决于力在滑移面内沿滑移方向上的分切应力大小。

$$\tau = \frac{F \cos \lambda}{A_0 / \cos \varphi} = \frac{F}{A_0} \cos \varphi \cos \lambda = \sigma \cos \varphi \cos \lambda = \sigma m$$

(2) 临界分切应力:

当外力 F 增加,使拉伸应力 F/A_0 达到屈服极限 σ_s 时,这一滑移系中的分切应力达到临界值 τ_c ,晶体就在该滑移系上开始滑移,此时的分切应力称为临界分切应力。

τ_c 是材料常数,与外力的大小、方向无关。

$$\tau_c = \sigma_s \cos \varphi \cos \lambda = \sigma_s m$$

(3) 单晶体的屈服极限表现为各向异性

软取向: m 值大, σ_s 最小,容易滑移

硬取向: m 值小, $\sigma_s = \infty$,难以滑移

4. 滑移时晶体的转动

(1) 滑移面和滑移方向的转动

由于垂直于滑移面的分正应力作用,使晶体的滑移面和滑移方向发生转动。

拉伸时, φ 角增大, λ 角减小;压缩时, φ 角减小, λ 角增大。

(2) 滑移面和滑移方向转动造成晶体位向的改变

1) 滑移过程中试样变形抗力的变化

滑移 \Rightarrow 晶体位向变化, $m \downarrow \Rightarrow$ 变形抗力 $\uparrow \Rightarrow$ 几何硬化

滑移 \Rightarrow 晶体位向变化, $m \uparrow \Rightarrow$ 变形抗力 $\downarrow \Rightarrow$ 几何软化:

2) 滑移过程中试样的滑移模式的变化

滑移 \Rightarrow 晶体位向变化 \Rightarrow 滑移模式转变

单滑移 \Rightarrow 双滑移 \Rightarrow 最终达到稳定取向

5. 多系统滑移

(1) 多滑移:多组滑移系统中,如果两个或多个滑移系同时处于最有利位置(m 值大),这些滑移系中的分切应力可能同时达到引起滑移的临界值,于是滑移过程将在两个或多个滑移系中同时进行

或交替地进行。这种在两个或更多的滑移系上进行的滑移称为多系滑移,简称多滑移。多滑移时产生的滑移带呈交叉形。

(2) 交滑移:由于晶体取向的改变,可能使两个或多个相交的滑移面沿同一滑移方向进行的滑移,称为交滑移。交滑移使加工硬化效果下降。交滑移时产生的滑移带呈曲折或波纹状。发生交滑移的位错一定是螺型位错。

(3) 双交滑移:发生交滑移的滑移系再次回到原滑移面而进行的滑移。

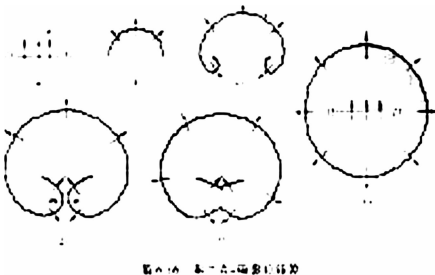
6. 滑移的位错机制

(1) 位错的运动与晶体的滑移

晶体的滑移是位错在切应力作用下沿滑移面逐步移动的结果。位错具有易动性,即通过原子的微小移动导致晶体的变形。当一条位错线移到晶体表面时,便会在晶体表面留下一个原子间距的滑移台阶,其大小等于该位错线的柏氏矢量的量值。

如果大量位错线依次扫过滑移面并移出晶体,就会在晶体表面形成显微镜下能观察到的滑移痕迹,这就是滑移线的实质。

(2) 晶体塑性变形时位错的增殖



位错的增值的主要机制是 F-R 源。

图中的 D、D' 两结点即为两个固定的结点,它们之间的位错线段 DD', 位于平行于纸面的滑移面上,位错线的柏氏矢量为 b 。

(3) 位错的交割与塞积

1) 交割:多滑移时,由于各滑移面相交,因而在不同滑移面上运动的位错也就必然相遇,发生相互交割。此外,在滑移面上运动的位错还要与晶体中原有的以不同角度穿过滑移面的位错相交割。

交割的结果:

- ①增加了位错线的长度;
- ②导致带割阶的位错运动困难,从而成为后续位错运动的障碍。

交割是加工硬化的形成原因之一。

2) 塞积:在切应力的作用下,位错源所产生的大量位错沿滑移面运动的过程中,若遇到障碍物(固定位错,杂质离子,晶界等)的阻碍,领先的位错在障碍前被阻止,后续的位错被堵塞,结果形成位错的平面塞积群,并在障碍物前端形成高度应力集中。应力集中大小 τ 与塞积的位错数目 n 成正比,即: $\tau = n \tau_0$ 其中的 τ_0 为滑移方向的分切应力值。位错数目 n 是与引起塞积的障碍到位错源的距离成正比。

位错塞积可能造成的后果:

①位错运动的阻力增大,如要继续滑移,则需要增加应力,这是加工硬化的另一形成原因.

②若塞积的位错是刃型的,则 n 足够大时,会出现微裂纹若障碍物是晶界,则可能引发邻近晶粒内的 $F-R$ 源开动,发生塑性变形。

③若位错是螺型的,障碍物是沉淀颗粒,则可能引起交滑移;若位错是刃型的,障碍物是沉淀颗粒,变形温度高,则可能引起位错的攀移

7. 单晶体的切应力——应变曲线

单滑移和多滑移的加工硬化效果不同. 从图可以看出,曲线的第一阶段只有一个滑移系起作用. 加工硬化效果很小,但达到第二阶段. 由于晶体的转动发生了多滑移. 此时由于不同滑移系间的交互交割. 使滑移受阻,加工硬化效果突然上升. 到了滑移的第三阶段,由于晶体取向的改变可能使两个或多个相交的滑移面沿一个滑移方向进行滑移,因而使加工硬化效果逐渐下降,这个过程称为交滑移

8. 孪生

(1) 孪生的概念

孪生是塑性变形的另一种基本方式。在切应力作用下晶体的一部分沿着特定晶面(孪生面)上的特定方向(孪生方向)相对于另一部分作均匀地切变。在金相显微镜下可以看到试样表面的孪晶痕,其形态为条带状或透镜状。

在切变区内,与孪生面平行的每一层原子的切变量与它距孪生面的距离成正比,并且不是原子间距的整数倍。这种切变不会改变晶体的点阵类型,但可使变形部分的位向发生变化,并与未变形部分的晶体以孪晶界为分界面构成了镜面对称的位相关系。通常把对称的两部分晶体称为孪晶,而将形成孪晶的过程称为孪生。

(2) 孪生变形的特点

		滑移	孪生
相同点		1. 切变;2. 沿一定的晶面、晶向进行;3. 不改变结	
不同点	晶体位向	不改变	改变,形成镜面对称关系
	位移量	滑移方向上原子间距的整数倍,较大。	小于孪生方向上的原子间距,较小
	对塑变的贡献	很大,总变形量大。	有限,总变形量小。
	变形应力	有一定的临界分切压力所需临界分切应力远高于滑移	所需临界分切应力远高于滑移
	变形条件	一般先发生滑移	滑移困难时发生
	变形机制	全位错运动的结果	分位错运动的结果

本节名校真题

一、名词解释：

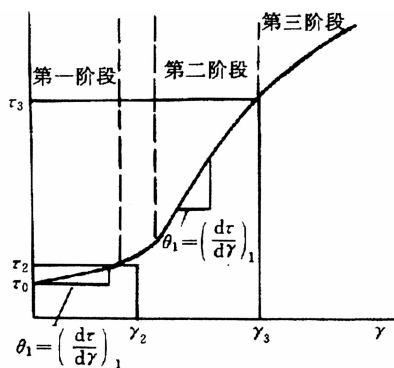
1. 滑移带. (2012 江苏大学)
2. 滑移面和滑移系. (2010 华南理工大学)
3. 孪生. (2012 华南理工大学)

二、填空题：

1. 单晶体塑性变形的两种主要方式为_____和_____. (2012 华南理工大学)
2. 金属塑性变形的方式大多数情况下是以_____方式进行的, 这种方式的实质是依靠_____的运动造成的. (2010 华南理工大学)

三、选择题：

1. 在拉伸过程中试样开始产生明显塑性变形的最小应力称之为_____. (2012 华南理工大学)
A. 抗拉强度 B. 屈服强度 C. 断裂强度
2. 镁具有密排六方结构, 主滑移面为基面, 滑移系少, 故塑性加工性能_____. (2012 华南理工大学)
A. 好 B. 中 C. 差
3. 密排六方晶格的滑移系有_____个 (2012 华南理工大学)
A. 12 B. 6 C. 3
4. 用增加位错密度提高金属材料强度的方法, 称之为_____. (2012 华南理工大学)
A. 固溶强化 B. 形变强化 C. 晶界强化
5. 根据滑移系的数目, 具有三种典型晶体结构金属的塑性好坏顺序一般是_____. (2010 华南理工大学)



- A. BCC > FCC > HCP
 - B. FCC > BCC > HCP
 - C. HCP > BCC > FCC
6. 滑移面及滑移方向与外力_____时, 最易滑移. (2011 华南理工大学)
A. 平行 B. 成 45° 夹角 C. 垂直

四、根据右图单晶体的切应力 - 应变曲线,说明塑性变形的三个阶段,并根据位错理论简要解释金属材料三个阶段的加工硬化机理。(2009 青岛科技大学)

五、什么是临界分切应力? 试推导其计算公式(2009 青岛科技大学)

六、一个 FCC 单晶金属沿 $[001]$ 方向拉伸,当应力达到 34.3MPa 时,沿 (111) 面 $[011]$ 方向滑移。计算导致滑移的临界分切应力。(2010 华南理工大学)

第二节 多晶体的塑性变形

本节常见题型有选择、填空题,也有简答题、计算题和综合分析题。

※本章复习要点

1. 掌握多晶体塑性变形的主要特点、晶界对变形的作用和晶粒大小对强度、塑性、韧性的影响规律。
2. 能够运用位错理论解释细晶强化的机理和多晶体的应力——应变曲线特征。

※本节重要考点

1. 重点掌握:晶界对变形的作用和晶粒大小对强度、塑性、韧性的影响规律。
2. 掌握:多晶体塑性变形的主要特点。
3. 理解:细晶强化的机理。

※本节重要概念

细晶强化

※考点精讲

1. 多晶体塑性变形的过程及特点

(1) 塑性变形过程。由于各晶粒间存在位相差,在外力作用下,位向最有利的少数晶粒开始发生塑性变形,随后这些已变形晶粒中的平面位错群在晶界塞积导致应力集中,这一应力集中和外力叠加,使相邻晶粒的位错源开动,驱动相邻晶粒进行协调的(多滑移)塑性变形。

(2) 多晶体塑性变形特点:

- ① 各晶粒的变形不是同时进行的;
- ② 为了协调先发生塑性变形的晶粒形状的改变,相邻各晶粒必须进行多滑移,其中包括取向并不有利的滑移系上同时进行滑移,这样才能保证其形状作各种相应地改变。根据理论计算,每个晶粒至少需要 5 个独立的滑移系启动。

③ 受晶界及各晶粒位向不同的影响,各晶粒间、晶粒内的变形是不均匀的。

2. 晶界对变形的阻碍作用及细晶强化

- ① 由于晶界的存在,使变形晶粒中的位错在晶界处受阻,滑移带终止于晶界;
- ② 由于各晶粒间存在位相差,为了协调变形,要求每个晶粒必须进行多滑移,而滑移时必然要发生位错的相互交割。这两者均将大大提高金属材料的强度。显然,晶界越多,即晶粒越细小,则其强化

效果越显著. 这种用细化晶粒增加晶界提高金属强度的方法称为细晶强化。

3. 晶粒大小对屈服强度的影响规律

Hall - Petch 公式: $\sigma_s = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}}$

式中, σ_0 为常数, 反映晶内对变形的阻力, 大体相当于单晶体金属的屈服强度; K 为常数, 表征晶界对强度影响的程度, 与晶界结构有关; d 为多晶体中各晶粒的平均直径。

4. 晶粒大小对塑性、韧性的影响

(1) 晶粒小, 塑性好。在相同外力的作用下, 细小晶粒的晶粒内部和晶界附近的应变相差较小, 变形较均匀, 由应力集中引起开裂的机会也较少, 这就有可能在断裂之前承受较大的变形量, 表现出高塑性。

(2) 晶粒小, 韧性好。细晶粒材料中, 应力集中小, 裂纹不易萌生; 晶界多, 裂纹不易扩展, 在断裂过程中吸收了较多的能量, 表现出高韧性。

本节名校真题

一、填空题:

1. 在常温下工作的金属材料, 晶粒细化, 会使金属的强度、硬度____、韧性____。(2010 华南理工大学)

2. 多晶体塑性变形的特点是____、____、____。(2004 华南理工大学)

3. 与单晶体相比较, 多晶体的塑性变形也是以____和____为基本方式, 但是受____和____的影响, 其变形抗力比单晶体高。(2011 华南理工大学)

二、简述晶界的特性。(2005 南京航空航天大学)

三、问答题: (2012 华南理工大学)

某黄铜合金材料, 在晶粒尺寸为 0.035mm 时屈服强度为 151MPa, 将该材料的晶粒尺寸细化到 0.015mm 时屈服强度升高至 170MPa, 且材料的塑性也有较大的提高。

(1) 若需要将材料屈服强度提高至 200 MPa, 则材料的晶粒尺寸应为多少?

(2) 为什么细化晶粒可以提高材料的塑性?

第三节 合金的塑性变形

本节常见题型有名词解释、选择、填空题, 也有简答题和综合分析题。

※本章复习要点

了解合金变形中溶质原子或弥散粒子对变形的作用, 理解加工硬化、细晶强化、弥散强化、固溶强化等产生的原因和它的实际意义。

※本节重要考点

1. 重点掌握: 合金塑性变形的特点。

2. 掌握:溶质原子或弥散粒子对合金塑性变形的影响

3. 理解:理解加工硬化、细晶强化、弥散强化、固溶强化等产生的原因和它的实际意义。

※ 本节重要概念

加工硬化,细晶强化,弥散强化,固溶强化。

※ 考点精讲

1. 单相固溶体合金的塑性变形

(1) 固溶强化:由于固溶体中存在溶质原子,使得合金的强度、硬度提高,而塑性、韧性有所下降。

(2) 产生固溶强化的原因:

① 溶质原子引起溶剂原子晶格畸变,阻碍位错运动;

② 溶质原子偏聚于位错周围,形成“柯氏气团”,对位错有钉扎作用。

(3) 固溶强化的效果:

① 在溶解度范围内,合金元素的质量分数越大,则强化作用越强;

② 溶质原子与溶剂原子的尺寸相差越大,则强化作用越强;

③ 形成间隙固溶体的溶质元素的强化作用大于形成置换固溶体的元素;

④ 溶质原子与溶剂原子的价电子数相差越大,则强化作用越强。

2. 多相合金的塑性变形

多相合金的组织可分为两大类:一类是由塑性相近、晶粒尺寸也相近的两相(固溶体)组成的合金,称为第一类多相合金,其强化方式为固溶强化。另一类是由塑性较好的固溶体基体及其上分布的硬脆性相所组成合金,称为第二类多相合金,其强化方式为固溶强化 + 第二相强化。

(1) 第一类多相合金的塑性变形

该类合金组成相的强化方式为均固溶强化,故合金强度为组成相的平均值,可以用下式表示:

$$\sigma = \varphi_{\alpha}\sigma_{\alpha} + \varphi_{\beta}\sigma_{\beta}$$

式中, σ_{α} 和 σ_{β} 分别为两相的强度极限; φ_{α} 和 φ_{β} 分别为两相的体积分数, $\varphi_{\alpha} + \varphi_{\beta} = 1$ 。可见,合金的强度随较强的一相的含量增加而呈线性增加。

(2) 第二类多相合金的塑性变形

该类合金的变形性能在很大程度上取决于第二相的分布情况。第二相的分布情况有三种情况:

1) 第二相在塑性相上呈片状或层状分布

可用 Hall - Petch 公式描述其屈服强度: $\sigma_s = \sigma_i + ks^{-\frac{1}{2}}$

式中, σ_i 为塑性基体的屈服强度; Ks 为常数; s 为片层间距。片层间距越小,则强度越高,塑性也越高。

2) 第二相在塑性相中呈颗粒状或弥散细小粒子分布

根据两者相互作用的方式,有以下两种强化机制:

①二相粒子坚硬不变形、尺寸较大时,位错绕过第二相粒子。这种位错以绕过机制通过障碍的强化方式,称为弥散强化。根据计算,位错绕过间距为 L 的第二相粒子时,所需的切应力 τ 为: $\tau = \frac{Gb}{L}$

②第二相硬度不很高、尺寸较小时,位错切过第二相粒子。这种位错以切过机制通过障碍的强化方式,称为沉淀强化。

3) 第二相在塑性相的晶界上呈连续网状分布

这种分布情况是最恶劣的,因为脆性相把塑性相分隔开,从而使其变形能力无从发挥,经少量的变形后,即沿着连续的脆性相开裂,使合金的塑性和韧性急剧下降。这时,脆性相越多,网越连续,合金的塑性也就越差,甚至强度也随之下降。生产上可通过热变形和热处理的相互配合来破坏或消除其网状分布。

本节名校真题

一、名词解释:

固溶强化。(2007 青岛科技大学)

二、选择题:

1. 弥散分布的小粒子的存在可增加材料的强度,其强化效果取决于_____。(2010 华南理工大学)

- A. 溶质原子的化合价
- B. 粒子的弹性应变速率
- C. 粒子的尺寸和体积百分数

三、问答题:

1. 试列举工程中三种常用金属材料强化方法,并简要说明强化原理。(2010 青岛科技大学)

2. Cu - 5% Sn 合金与纯铜的弹性模量相同,但屈服强度却是纯铜的 3 倍,请解释这一现象的原因。(2012 华南理工大学)

3. 什么是固溶强化? 综述产生固溶强化的原因及合金元素形成固溶体时其固溶强化的规律。(2011 华南理工大学)

4. 试述针对工业纯铝、Al - 5% Cu 合金、Al - 5% Al_2O_3 复合材料可能采取哪些主要的强化机制来进行强化,为什么?(2011 华南理工大学)

第四节 塑性变形对组织和性能的影响

本节常见题型有名词解释、选择、填空题,也有简答题和综合分析题。

※本章复习要点

熟悉塑性变形后金属内部组织和性能的变化,以及这些变化的实际意义。

※本节重要考点

1. 重点掌握:塑性变形后金属内部组织的变化。

2. 掌握:塑性变形后金属性能的变化
3. 理解:加工硬化的原理及其实际意义

※本节重要概念

形变织构,丝织构,板织构,加工强化。

※考点精讲

1. 塑性变形对金属组织结构的影响

多晶体金属经塑性变形后,除了在晶粒内出现滑移带和孪晶等组织特征外,还具有以下组织结构的变化:

(1)形成纤维组织. 塑性变形后,晶粒沿变形方向逐渐伸长,变形量越大,晶粒伸长的程度也越大. 当变形量很大时,晶粒呈现出一片如纤维状的条纹,称为纤维组织. 当金属中有杂质存在时,杂质也沿变形方向拉长为细带状(塑性杂质)或粉碎成链状(脆性杂质)。

(2)形变亚结构的形成及细化.

1)形变亚结构的形成机理. 在切应力作用下,位错源所产生的大量位错沿滑移面运动时,将遇到各种阻碍位错运动的障碍物,如晶界、亚晶界、第二相颗粒及割阶等,造成位错缠结. 这样,金属中便出现了由高密度的缠结位错分隔开的位错密度较低的区域,即形变亚结构。

2)亚结构的细化. 形变亚结构的边界是严重晶格畸变区,堆积大量位错,而内部的晶格则相对完整,仅有稀疏的位错网络,这种亚结构也称为胞状亚结构或形变胞. 胞块间的夹角不超过 2° , 胞块直径为 $1 \sim 0.01$ 微米(注:塑性变形前,铸态金属的亚结构直径为 100 微米),胞壁的厚度约为胞块直径的 $1/5$. 变形量越大,则胞块的数量越多,尺寸减小,胞块间的取向差也逐渐增大,且其形状随着晶粒形状的改变而变化,均沿着变形方向逐渐拉长。

(3)变形织构.

与单晶体一样,多晶体在塑性变形时也伴随着晶体的转动过程,故当变形量很大时,多晶体中原为任意取向的各个晶粒会逐渐调整其取向而趋于一致,这种现象称为晶粒的择优取向,这种由于金属塑性变形使晶粒具有择优取向的组织叫做形变织构。同种材料随着加工方式的不同,可能出现不同类型的织构:

- 1)丝织构:在拉拔时形成,其特征是各晶粒的某一晶向与拉拔方向平行或接近平行。
- 2)板织构:在轧制时形成,其特征是各晶粒的某一晶面与平行于轧制平面,而某一晶向平行于轧制方向。

性能特点:显示出各向异性

利弊:变压器铁心用的硅钢片,(100)晶面沿 $\langle 100 \rangle$ 方向最易磁化,可减少铁损;产生所谓的“制耳”现象。

2. 塑性变形对金属性能的影响

(1)金属产生加工硬化(也称形变强化)

在塑性变形过程中,随着金属内部组织的变化,金属的力学性能也将产生明显的变化,即随着变形程度的增加,金属的强度、硬度增加,而塑性、韧性下降,这一现象即为加工硬化或形变硬化。加工硬化的原因:与位错的交互作用有关。随着塑性变形的进行,位错密度不断增大,位错运动时的相互交割加剧,产生固定割阶、位错缠结等障碍,使位错运动的阻力增大,引起形变抗力的增加,金属的强度提高。

加工硬化的是强化金属材料的方法之一。对于用热处理方法不能强化的材料来说,用加工硬化方法提高其强度就显得更为重要加工硬化的不利影响:随着变形度的提高,金属变形抗力增加,继续变形困难,因此需要退火热处理消除加工硬化效应,以避免金属变形时开裂,降低动力、模具消耗。

(2) 塑性变形对金属其它性能的影响

随着变形度的增大,电阻不断下降。金属的电阻与晶体中点缺陷的密度有关,点缺陷所引起的晶格畸变会使电子产生散射,提高电阻率,它的散射作用比位错所引起的更为强烈。

随着变形度的增大,金属的密度、热导率略有下降;磁导率、磁饱和度下降,但磁滞和矫顽力增加。

随着变形度的增大,由于点缺陷密度的升高,金属的内能提高,使其化学活性提高,腐蚀尤其应力腐蚀倾向显著增加。

此外,塑性变形后,由于金属中的晶体缺陷(位错及空位)增加,使扩散激活能减少,扩散速度增加。

3. 残余内应力和点阵畸变

金属在塑性变形过程中,外力所作的功大部分转化为热能,但尚有一部分(约占总变形功的10%)保留在金属内部,形成残余内应力和点阵畸变。

(1) 宏观内应力(第一类内应力)

由于金属工件或材料各部分的不均匀变形所引起的,它是整个物体范围内处于平衡的力,当除去它的一部分后,这种力的平衡就遭到破坏,并立即产生变形。

(2) 微观内应力(第二类内应力)

由于晶粒或亚晶粒变形不均匀而引起的,它是在晶粒或亚晶粒范围内处于平衡的力,此应力在某些局部地区可达很大数值,可能致使工件在不大的外力下产生显微裂纹,进而导致开裂。

(3) 点阵畸变(也称第三类内应力)

塑性变形使金属内部产生大量的位错和空位,使点阵中的一部分原子偏离其平衡位置,造成点阵畸变。这种点阵畸变所产生的内应力作用范围更小,只在晶界、滑移面等附近不多的原子群范围内维持平衡。它使金属的硬度、强度升高,而塑性和耐蚀能力下降。

残余应力的弊与利:变形、开裂和产生应力腐蚀;工件表面压应力可有效提高零件的疲劳寿命。

本节名校真题

一、名词解释:

形变织构。(2004 江苏大学)

二、填空题：

1. 出现织构后,多晶体金属就显示_____。有织构的板材冲压杯状零件时,边缘不齐壁厚不均,产生所谓_____现象。(2012 江苏大学)
2. 残余应力中,第一类内应力也称为_____,第二类内应力也称为_____,第三类内应力也称为_____。(2012 江苏大学)

三、简答题：

1. 简述铝合金的强化方式。(2010 华南理工大学)
2. 简述金属塑性变形后组织和性能的变化。(2013 哈尔滨工业大学)

四、问答题：

什么叫加工硬化? 简述加工硬化的原因(2012 华南理工大学)

第七章 金属及合金的回复与再结晶

第一节 形变金属在加热过程中的变化

本节常见题型有名词解释、选择、填空题。

※本章复习要点

以驱动力为线索,理解重要概念及其区别,重点掌握冷变形金属在退火时的组织、残余内应力、力学性能和其他性能的变化规律。

※本节重要考点

1. 重点掌握:冷变形金属在退火时的组织、残余内应力、力学性能和其他性能的变化规律。
2. 掌握:晶体的滑移过程、滑移带和滑移线的形成,滑移系的特点。
3. 理解:回复、再结晶的概念及其区别。

※本节重要概念

回复,再结晶。

※考点精讲

1. 变化的驱动力

(1) 储存能:存在于冷形变金属内部的一小部分(约为10%)变形功。形变温度越低,形变量越大,则储存能越高。

(2) 存在形式:弹性应变能(3%~12%)+点阵畸变能

点阵畸变能包括点缺陷能和位错能,点缺陷能所占的比例较小,而位错能所占比例较大,约占总储存能的80~90%。

(3) 由于储存能的存在,使形变金属的自由能升高,在热力学上处于亚稳定状态,它具有向形变前的稳定状态转变的趋势,但在室温下,这种转变难以进行。如果温度升高,形变金属就能由亚稳态向稳态转变。可见,储存能的降低是这一转变过程的驱动力。

2. 回复与再结晶的概念

(1) 回复——冷变形金属在低温加热时,其显微组织无可见变化,但其物理、力学性能却部分恢复到冷塑性变形以前的过程。

晶粒仍保持伸长的纤维状。

(2) 再结晶——冷变形金属被加热到适当温度后,在变性组织内部新的无畸变的等轴晶粒逐步取代变形晶粒,而使形变强化效应完全消失的过程。

3. 显微组织的变化

随着温度的升高,金属的显微组织的变化三个阶段:

(1)回复阶段($0 - T_1$):

光学显微组织无可见变化,

晶粒仍保持伸长的纤维状.

(2)再结晶阶段($T_1 - T_2$):

纤维状晶粒变完全改组为新的等轴晶粒.

(3)晶粒长大阶段($T_2 - T_3$):

新的等轴晶粒相互吞并而长大,直到 T_3 ,晶粒长大一个较为稳定的尺寸.

4. 储存能及内应力的变化

(1)储存能的变化。

在加热过程中,形变金属的内应力得以松弛,储存能也逐渐释放出来。根据材料种类的不同,储存能释放曲线有三种形式。它们的共同点是每条曲线都出现一个高峰,曲线的高峰开始出现的地方对应于第一批再结晶出现的温度。在此温度之前,只发生回复,不发生再结晶。

(2)内应力的变化

在回复阶段,大部分甚至全部第一类内应力可以得以消除,第二类或第三类内应力只能消除一部分。再结晶之后,所有内应力完全消除。

5. 力学性能的变化

在回复阶段:硬度、强度均略有下降,而塑性有所提高。在再结晶阶段:硬度、强度均显著下降,塑性大大提高。在晶粒长大阶段:强度、硬度继续下降,塑性继续提高,粗化严重时下降。

6. 其他性能的变化

金属的电阻与晶体中点缺陷的浓度有关。随着加热温度的升高,变形金属中的点缺陷浓度明显降低,因此在回复和再结晶阶段,电阻均发生了比较明显的变化,电阻不断下降。此外,点缺陷浓度的降低,还将使金属的密度不断增加,应力腐蚀倾向显著减小。

本节名校真题

一、名词解释:回复 (2012 青岛科技大学)

二、填空题:

1. 形变金属在退火处理时,随着保温时间的延长,会发生_____、_____和_____三个阶段的变化。(2011 华南理工大学)

三、判断题:

1. 金属在再结晶前后,各晶粒的晶格类型不变,成分不变。(2011 华南理工大学)

2. 回复可使冷变形金属的加工硬化效果及内应力消除。(2007 青岛科技大学)

第二节 回复

本节常见题型有名词解释、选择、填空题。

※本章复习要点

了解回复动力学规律,熟悉冷变形金属在不同温度的回复机制,了解回复退火前后的亚结构特征,以及回复退火的功效

※本节重要考点

1. 重点掌握:熟悉冷变形金属在不同温度的回复机制。
2. 掌握:回复退火。
3. 理解:回复动力学规律和回复退火前后的亚结构特征。

※本节重要概念

回复退火。

※考点精讲

1. 回复过程及其动力学特征

回复是指经冷塑性变形的金属在加热时,在光学显微组织发生变化前所产生的某些亚结构和性能的变化过程。

回复的程度是温度 and 时间的函数。温度越高,回复的程度越大。温度一定时,回复的程度随时间的延长而逐渐增加。但在回复初期,变化较大,随后就逐渐变慢,当达到一个极限值后,回复停止。

2. 回复机制

一般认为,回复是空位和位错在退火过程中发生运动,从而改变了它们的数量和组态的过程。

(1) 低温回复($0.1 \sim 0.3T_m$)时,主要涉及空位运动:它们可以移至表面、晶界或位错处消失,也可以聚合成空位对、空位群,还可以与间隙原子相互作用而消失。总之,空位运动的结果,使空位浓度大大减小。

(2) 较高温度回复($0.3 \sim 0.5T_m$)时,位错能够滑移,同一滑移面上的异号位错可以相互吸引而消失,使位错浓度减小。

(3) 更高温度回复($> 0.5T_m$)时,位错不但可以滑移,而且可以攀移,发生多边化。多边化是冷变形金属加热时,原来处于滑移面上的位错,通过滑移和攀移(是指刃型位错沿垂直于滑移面的方向运动),形成与滑移面垂直的亚晶界的过程。

3. 亚结构的变化

金属材料经多滑移变形后形成胞状亚结构,胞内位错密度较低,胞壁处集中着缠结位错,位错密度很高。

经短暂回复退火后,空位浓度大大下降,胞内的位错向胞壁滑移,与胞壁内的异号位错相抵消,位错密度有所下降。随着回复的进一步进行,胞壁中的位错逐渐形成低能态的位错网络,胞壁变得比较明晰而成为亚晶界,接着这些亚晶界通过亚晶界的迁移而逐渐长大,亚晶粒内的位错密度进一步下降。回复温度越低,变形量越大,则回复后的亚晶粒越细小。

4. 回复退火的作用

回复退火在工程上称之为去应力退火。

功效:使冷加工的金属件在基本上保持加工硬化状态的条件下降低其内应力(主要是第一类内应力),防止工件变形、开裂,保持形状、尺寸精度,降低电阻率,提高材料的耐蚀性并改善其塑性和韧性,提高工件使用的安全性。

本节名校真题

一、名词解释:回复;(2012 青岛科技大学)

二、选择题:

1. 高温回复阶段,金属中亚结构发生变化时,(华南理工大学 2010 年)

- A. 位错密度增大
- B. 位错发生塞积
- C. 形成位错缠结
- D. 刃型位错通过滑移和攀移构成亚晶界

第三节 再结晶

本节常见题型以名词解释、选择、填空题等分值较小的题型为主,也有分值较大的简答题。

※本章复习要点

根据工件是否有驱动力判断其是否可以通过再结晶的方式改善组织和性能,熟悉再结晶形核、长大机制及其适用条件,掌握影响再结晶的主要因素和控制再结晶晶粒大小的方法。

※本节重要考点

- 1. 重点掌握:掌握影响再结晶的主要因素和控制再结晶晶粒大小的方法。
- 2. 掌握:再结晶形核、长大机制及其适用条件。
- 3. 理解:再结晶的驱动力。

※本节重要概念

再结晶退火,临界变形度。

※考点精讲

1. 再结晶晶核的形成

再结晶:冷变形金属加热到一定温度或保温足够时间后,在原来的变形组织中产生了新的无畸变的等

轴晶粒,位错密度显著下降,性能也发生显著变化,并恢复到冷变形前的水平,这个过程称为再结晶。

再结晶并不是一个简单地恢复到变形前组织的过程,两者的晶粒大小并不一定相同。

(1) 亚晶长大形核机制(适用于大变形度)

在回复阶段,塑性变形所形成的胞状组织经多边形化后转变为亚晶,其中有些亚晶粒就会逐渐长大,发展成为再结晶的晶核,这种亚晶成为再结晶晶核的方式有两种:

1) 亚晶界移动形核

它是依靠某些局部位错密度很高的亚晶界的移动,吞并相邻的变形基体和亚晶而成长为再结晶晶核。

2) 亚晶合并形核 相邻亚晶界上的位错,通过攀移和滑移,转移到周围的晶界或亚晶界上,导致原来亚晶界的消失,然后通过原子扩散和位置的调整,终于使两个或更多个亚晶粒的取向变为一致,合并成为一个大的亚晶粒,成为再结晶的晶核。

(2) 晶界凸出形核机制(变形度约小于 40%)

又称为晶界弓出形核。由于变形度小,所以金属的变形不均匀,有的晶粒变形度大,位错密度也大;有的晶粒变形度小,位错密度也小。回复退火后,它们的亚晶粒大小也不同。在再结晶退火时,在显微镜下可以直接观察到,晶界中的某一段就向亚晶粒细小、位错密度高的一侧弓出,被这段晶界扫过的区域,位错密度下降,成为无畸变的晶体,这就是再结晶晶核。

2. 再结晶晶核的长大

当再结晶晶核形成之后,它就可以自发、稳定地生长。晶核在生长时,其界面总是向畸变区域推进。

界面移动的驱动力:无畸变的新晶粒与周围基体的畸变能差。

界面移动的方向:背离界面曲率中心。

当旧的畸变晶粒完全消失,全部被新的无畸变的再结晶晶粒所取代时,再结晶过程即告结束,此时的晶粒即为再结晶初始晶粒。

3. 再结晶温度及其影响因素

(1) 再结晶温度:经过严重冷变形(变形在 70% 以上)的金属,在约 1h 的保温时间内能够完成再结晶(>95% 转变量)的温度。

$$T_{\text{再}} = KT_m$$

式中 K 与材料纯度、变形量、变形温度等有关。再结晶不是相变,再结晶温度不确定,可以在一个较宽的范围内变化。

(2) 影响再结晶温度的因素

① 变形度. 在一定的变形度范围内,变形度大,储存能多,再结晶驱动力大, $T_{\text{再}}$ 再低。

② 变形金属中杂质和合金元素含量. 含量高,位错、晶界移动的阻力大,同时溶质原子的扩散速度低, $T_{\text{再}}$ 再高。

③ 变形金属的晶粒大小. 晶粒小,晶界多,易形核, $T_{\text{再}}$ 再低。

④ 加热速度和保温时间. 加热速度慢, 回复充分, 储存能减少, 驱动力少, T 再高; 保温时间长, 利于形核、长大, T 再低

4. 再结晶晶粒大小的控制

再结晶晶粒的平均直径 d 可表示为: $d = K \left(\frac{G}{N} \right)^{\frac{1}{4}}$

式中, N 为形核率, G 为长大速度, K 为材料常数. 下面讨论影响 G 、 N 的因素.

(1) 避开临界变形度

当变形度很小时, 晶粒大小没有变化. 当变形度达到某一值 (2% - 10%) 时, 晶粒突然粗大. 通常把对应于特粗大晶粒的变形度称为临界变形度. 当变形度超过临界变形度后, 晶粒随变形度增大而变得细小.

(2) 加热温度要适当。

(3) 金属的原始晶粒尺寸要细小. 变形度一定时, 原始晶粒度越细, 晶界越多, 再结晶形核容易, 所以再结晶晶粒也越细小。

(4) 基体中加入合金元素, 有利于细化再结晶晶粒. 溶入基体中的合金元素, 一方面增加变形金属的储存能, 另一方面阻碍晶界的运动受阻, 一般均起细化晶粒的作用。

本节名校真题

一、名词解释: 临界变形度 (2012 年江苏大学)

二、填空题:

影响再结晶温度的因素____、____、____、____。(2012 年青岛科技大学)

三、简答题:

将一个楔形的板坯冷轧后, 可以得到相同厚度的板材, 但是经退火处理后发现板材 两端的抗拉强度不同, 请解释这个现象。(2010 年华南理工大学)

第四节 晶粒长大

本节常见题型以名词解释、选择、填空题等分值较小的题型为主, 也有分值较大的简答题。

※本章复习要点

熟悉再结晶后晶粒的正常长大与异常长大规律, 能够利用相关理论控制最终晶粒大小

※本节重要考点

1. 重点掌握: 再结晶后晶粒的正常长大与异常长大规律。

2. 掌握: 控制最终晶粒大小的途径。

3. 理解: 晶粒正常长大晶的驱动力。

※ 本节重要概念

二次再结晶,退火孪晶,再结晶组织。

※ 考点精讲

1. 晶粒长大的概念和类型

概念:再结晶阶段刚结束时,一般得到细小的等轴晶粒,当温度继续升高或进一步延长保温时间时,晶粒之间就会互相吞并而长大,这一现象称之为晶粒长大,或聚合再结晶。根据再结晶后晶粒长大过程的特征,可将晶粒长大分为两种类型:一种是随温度的升高或保温时间的延长晶粒均匀连续地长大,称之为正常长大;另一种是晶粒不均匀不连续地长大,称之为反常长大,或二次再结晶。

2. 晶粒的正常长大

(1) 晶粒正常长大驱动力

从整体来看,晶粒长大的驱动力是晶粒长大前后总的界面自由能差。细晶粒的晶界多,界面能高。

对某一段晶界来说,晶界迁移的驱动力与晶界的界面能和晶界的曲率有关。

(2) 晶粒正常长大的稳定形状

1) 晶界迁移朝向晶界的曲率中心方向;

2) 随着晶界迁移,晶界趋于平直化;

3) 三个晶粒的晶界交角趋于 120° ,使晶界处于平衡状态。

(3) 影响晶粒正常长大的因素

1) 温度。温度高,原子扩散快,晶界迁移快,晶粒粗大

2) 杂质和合金元素。杂质和合金元素溶入基体,阻碍晶界移动,尤其是偏聚于晶界的元素明显降低晶界能,使晶界移动的驱动力变小,晶界不易移动,晶粒细小。

3) 第二相质点。第二相质点越细小弥散,则阻碍晶界移动的能力越强,晶粒越细小。

3. 晶粒的反常长大(二次再结晶)

(1) 特征:一次再结晶完成之后,继续保温或提高加热温度时,绝大多数晶粒长大速度很慢,只有极少数晶粒长得异常迅速,直至这些迅速长大的晶粒相互接触为止。该过程也称二次长大。

(2) 产生原因:弥散的夹杂物、第二相粒子等分布不均匀,或不均匀地溶解于基体组织。

4. 再结晶退火的组织

(1) 再结晶退火:再结晶退火是将冷变形金属加热到规定温度,并保温一定时间,然后缓慢冷却到室温的一种热处理工艺。其目的是降低硬度,提高塑性,恢复并改善材料的性能。再结晶退火成为冷成型工艺中间不可缺少的工序。

$$T_{\text{退火}} = T_{\text{再}} + 100 - 200^\circ\text{C}$$

(2) 再结晶图

将晶粒大小、变形程度和退火温度之间的关系,绘制成立体图形,称谓“再结晶图”。它是制订生

产工艺、控制冷变形金属退火后晶粒大小的依据。

将晶粒大小、变形程度和退火温度之间的关系,绘制成立体图形,称谓“再结晶图”。它是制订生产工艺、控制冷变形金属退火后晶粒大小的依据。

(3)再结晶织构和退火孪晶

1)再结晶织构。具有形变织构的金属经再结晶之后,形变织构可能消失,也可能保留下来,还可能出现新织构。这种金属再结晶退火后形成的织构称为再结晶织构。再结晶织构工件表现出各向异性。

再结晶织构的形成与变形程度和退火温度有关。变形度大、退火温度高,再结晶织构明显。

2)再结晶孪晶。某些 FCC 结构的金属及合金,如铜及铜合金、奥氏体不锈钢等经再结晶退火后,经常出现孪晶组织,这种孪晶称为再结晶孪晶或退火孪晶,以便于在塑性变形时得到的形变孪晶相区别。

本节名校真题

一、名词解释:

再结晶退火(河北工业大学 2010 年);再结晶织构(华南理工大学 2010 年)

二、简述:

晶粒长大的驱动力及影响晶粒长大的主要因素。(华南理工大学 2012 年)

三、二次再结晶是在什么情况下产生的?论述二次再结晶的晶粒反常长大过程。(15 分)(华南理工大学 2010 年)

第五节 金属的热变形

本节常见题型以名词解释、选择、填空题等分值较小的题型为主,也有分值较大的简答题、综合分析题。

※本章复习要点

掌握热变形与冷变形的本质区别,熟悉热变形对金属及合金组织与性能的影响,比较动态再结晶组织和静态再结晶组织。

※本节重要考点

1. 重点掌握:热变形与冷变形的本质区别。
2. 掌握:热变形对金属及合金组织与性能的影响。
3. 理解:较动态再结晶组织和静态再结晶组织。

※本节重要概念

热变形,动态再结晶,带状组织,纤维组织。

※考点精讲

1. 热变形与冷变形

在再结晶温度以上的变形过程称为热变形或称热加工;在再结晶温度以下的变形过程称为冷变

形或冷加工。

在热变形过程中,在金属内部同时进行着加工硬化与回复再结晶软化两个相反的过程。这时的回复和再结晶是边变形、边发生的,因此称为动态回复和动态再结晶,而把变形中断或终止后的保温过程中,或者在随后的冷却过程中所发生的回复与再结晶,称为静态回复和静态再结晶。

动态回复与动态再结晶的特点:晶粒内部包含着被位错缠结所分割的亚晶粒,位错密度高;反复形核,有限长大,晶粒较细。

2. 热变形后的组织与性能

金属热变形的组织与性能受变形温度、变形速率、变形度和金属本身性质等因素的影响。

(1)改善铸锭组织。如气泡焊合、缩孔压实,使金属材料的致密度提高。铸态时粗大的柱状晶变细,某些合金钢中的大块碳化物初生晶可破碎并均匀分布。在温度和压力作用下原子扩散速度加快没扩散距离减小,因而偏析可部分消除,成分比较均匀,强度、塑性、韧性等大幅度提高。

(2)纤维组织(或流线)

在热变形中,铸锭中的粗大枝晶和各种夹杂物都要沿变形方向伸长,其中脆性的杂质物破碎成链状,而塑性的夹杂物(如 MnS)则变成条带状、线状、或片层状,在宏观试样上沿着变形方向变成一条条细线,称其为流线。由一条条流线勾划出来的组织,称为纤维组织。纤维组织的出现,使金属的力学性能呈现各向异性。通过控制流线与零件外形一致,可以获得比机械加工性能高出 30% 以上的零件。

(3)带状组织

复相合金中的各个相,在热变形时沿着变形方向交替地呈带状分布,这种组织称为带状组织。

通常带状组织有两种:

1)呈两相组织的钢经过热变形后形成带状组织。

2)在铸锭中存在偏析区和夹杂物,压延时偏析区和夹杂物沿变形方向身长呈条带状分布,冷却时即形成带状组织。

(4)晶粒大小

正常的热变形一般可使晶粒细化。晶粒能否细化取决于变形量、热加工温度尤其是终锻(轧)温度及锻后冷却等因素。一般的,采用低的变形终止温度、大的最终变形量、快的冷却速度可获得细小晶粒。在变形量很大($>90\%$),且变形温度很高时加工,会引起二次再结晶。终锻温度超过再结晶温度过高,且锻后冷却速度过慢,会造成晶粒粗大(也称为过热)。但终锻温度过低,又会造成加工硬化及残余应力。

本节名校真题

一、名词解释:

热加工 (2012 青岛科技大学)

二、填空题:

1. 在金属学中,冷、热加工的界限是以金属的_____来划分的,因此铜($T_m = 1084^\circ\text{C}$)在室温

下变形加工称为 的变形加工称为 加工;而锡 ($T_m = 232^\circ\text{C}$) 在室温下的变形加工称为 加工。(2010 年华南理工大学)

三、归纳细化合金晶粒组织的热加工工艺方法。(2013 年哈尔滨工业大学)

四、简述铸锭中常见的宏观组织缺陷,消除或改善方法。(2011 年河北工业大学)

五、热加工过程中,可采取哪些措施控制金属材料的组织?(2010 年河北工业大学)

第八章 扩 散

第一节 概述

本节常见题型以名词解释、选择、填空题等分值较小的题型为主,也有分值较大的简答题。

※本章复习要点

重点掌握固态金属中扩散的微观机制及扩散驱动力,了解固态金属扩散的类别。

※本节重要考点

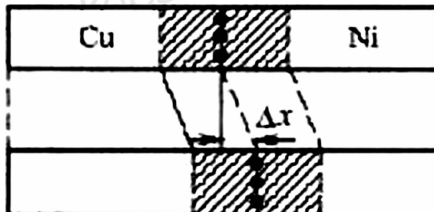
1. 重点掌握:固态金属中扩散的微观机制及扩散驱动力。
2. 掌握:固态金属扩散的类别。
3. 理解:固态金属扩散的驱动力和柯肯达尔效应的本质原因

※本节重要概念

上坡扩散,柯肯达尔效应。

※考点精讲

1. 扩散现象



实验:将纯 Cu 和纯 Ni 对焊成扩散偶,并在焊接界面上事先镶嵌钨丝作为惰性标记,将扩散偶加热并长时间保温。

现象:钨丝(界面)向右侧(Ni 一侧)移动了一段距离

结果与分析:界面的左侧(Cu 侧)含有 Ni 原子,而右侧(Ni 侧)含有 Cu 原子,但是左侧 Ni 的浓度大于右侧 Cu 的浓度,这表明, Ni 向左侧扩散过来的原子数目大于 Cu 向右侧扩散过来的原子数目。即扩散偶的右侧(Ni 一侧)向左侧(Cu 一侧发生了物质净输送,过剩的 Ni 原子使得左侧的点阵膨胀,而右边原子减少的地方发生点阵收缩,其结果导致界面向右移动。这就是著名的柯肯达尔效应(1947 年首次发现)。

实验结论:Cu、Ni 原子发生了互扩散,且 Ni 原子比 Cu 原子具有更快的扩散速度(或扩散系数更大)。

其他扩散现象:

- 1) 渗碳时碳向钢中的扩散;

2) 氧化时氧向钢中的扩散;

3) 枝晶偏析的铸件在扩散退火处理时成分的均匀化;

4) 有的杂质原子向晶界的偏聚;

5) 奥氏体的共析转变和过饱和固溶体的分解。

2. 扩散的本质

扩散时固体金属中原子的迁移过程是如何进行的呢?

(1) 金属晶体中的原子以结点为中心以极高的频率进行着热振动, 由于存在能量起伏, 总会有部分原子具有足够高的能量, 跨越能垒 Q , 从原来的平衡位置跃迁到相邻的平衡位置。显然, 原子的结合力越大, 排列得越紧密, 则能垒越高, 激活能越大, 原子依靠能量起伏实现跃迁换位越困难。温度越高, 原子迁移几率则越大。

(2) 扩散过程不是原子的定向跃迁过程, 而是随机跃迁过程, 被称为原子的随机行走。固体扩散是大量原子无序跃迁的统计结果, 即在同一时间内, 向某方向跃迁的原子数大于反向跳回来的原子数, 从而造成物质的定向传输。

3. 扩散机制

对于固态金属来说, 原子扩散机制主要有两种。

(1) 空位扩散机制 在自扩散和涉及置换原子的扩散过程中, 原子可离开其点阵位置, 跳入邻近的空位, 这样就会在原来的点阵位置产生一个新的空位。当继续扩散, 就产生原子于空位两个相反的迁移流向, 称为空位扩散。自扩散和置换原子的扩散程度取决于空位数目。温度越高, 空位浓度越大, 金属中原子的扩散越容易。

(2) 间隙扩散机制 晶体中的间隙原子可从一个间隙位置移动到另一个间隙位置。这种机制不需要空位。间隙原子尺寸越小, 扩散越快。由于间隙位置比空位位置多, 间隙扩散比空位扩散更易发生。

无论是间隙原子或置换原子, 为了跃迁到一个新位置, 扩散原子必须克服一个能垒, 这个能垒称为激活能, 激活能越低, 扩散越容易。通常, 间隙原子越过周围的原子所需的能量较低, 所以间隙扩散比空位扩散的激活能要低。

4. 固态金属扩散的条件

固态金属中的扩散必须满足四个条件。

(1) 扩散要有驱动力

没有扩散驱动力, 就不可能发生扩散。扩散的驱动力是化学位梯度, 而不是浓度梯度。当浓度梯度与化学位梯度方向一致时, 溶质原子就会从高浓度地区向低浓度地区迁移; 相反, 当浓度梯度与化学位梯度方向不一致时, 溶质原子就会从低浓度地区向高浓度地区迁移。

扩散的其他驱动力: 应力梯度, 电位梯度, 温度梯度。

(2) 扩散原子要固溶

扩散原子在基体金属中必须有一定的固溶度,能够溶入基体晶格,形成固溶体,这样才能进行固态扩散。

(3)温度要足够高

固态扩散是依靠热激活而进行的过程.当温度低于一定温度时,原子热激活的几率趋近于零,表现不出物质输送的宏观效果.铁原子在 500°C 以上时才能有效地进行扩散。

(4)时间要足够长

扩散原子在晶体中每跃迁一次最多只能移动 $0.3 - 0.5\text{nm}$ 的距离,要扩散 1mm 的距离,必须跃迁亿万次才行,何况原子跃迁的过程是随机的,只有经过相当长的时间才能造成物质的宏观定向迁移。由此可见,如果采用快速冷却到低温的方法,使扩散过程“冻结”,就可以把高温下的状态保持下来。

5. 固态扩散的分类

(1)根据扩散过程是否发生浓度变化进行分类:

1)自扩散 不伴有浓度变化的扩散,与浓度梯度无关.自扩散只发生在纯金属和均匀固溶体中.例如纯金属和均匀固溶体的晶粒长大过程。

2)互(异)扩散 伴有浓度变化的扩散,与异类原子的浓度差有关.如在不均匀固溶体中,不同相或不同材料制成的扩散偶之间的扩散过程中,异类原子相对扩散,互相渗透。

(2)根据扩散方向是否与浓度梯度方向相同进行分类:

1)下坡扩散 沿着浓度降低方向进行的扩散,使浓度趋于均匀化.如铸锭(件)的均匀化退火、渗碳等过程都属于下坡扩散。

2)上坡扩散 沿着浓度升高方向进行的扩散,使浓度发生两极分化.如奥氏体向珠光体转变过程中,碳原子从浓度较低的奥氏体向浓度较高的渗碳体扩散,就是上坡扩散。

(3)根据扩散过程中是否出现新相进行分类

1)原子扩散 在扩散过程中晶格类型始终不变,没有新相产生。

2)反应扩散 通过扩散使固溶体的溶质组元浓度超过固溶体极限而形成新相的扩散过程,又称相变扩散.反应扩散包括两个过程:一是原子扩散过程,二是当界面上扩散组元达到一定浓度时即发生相变反应的过程.反应扩散所形成的相可参考相应的相图进行分析。

本节名校真题

一、名词解释:

上坡扩散 (2010 青岛科技大学);柯肯达尔效应(2012 华南理工大学)

二、选择题

1. 间隙固溶体中原子扩散机制为_____。(2011 华南理工大学)

A. 换位扩散机制 B. 空位扩散机制 C. 间隙扩散机制

2. 上坡扩散的原因是_____。

A. 电位差

B. 化学位梯度

C. 相位差

(2011 河北工业大学)

三、简答题:

扩散的驱动力是什么? 固态金属中要发生扩散必须满足哪些条件? (2005 中山大学)

第二节 扩散定律

本节常见题型包括名词解释、选择、填空题简答题和论述题。

※本章复习要点

正确理解菲克定律的物理意义及各物理量的含义和量纲,并能够运用菲克定律解决较简单的扩散问题。

※本节重要考点

1. 重点掌握:菲克定律解决较简单的扩散问题的求解方法。

2. 掌握:菲克定律的物理意义及各物理量的含义和量纲

3. 理解:理解稳态扩散核非稳态扩散

※本节重要概念

稳态扩散,非稳态扩散。

※考点精讲

1. 菲克第一定律

在扩散过程中,在单位时间内通过垂直于扩散方向的单位截面积的扩散通量 J 与浓度梯度 dc/dx

成正比. 其数学表达式为: $J = -D \frac{dC}{dx}$

式中, D 为扩散系数, dC/dx 为体积浓度梯度,负号表示物质的扩散方向与浓度梯度的方向相反。

该定律仅适合稳态扩散,即扩散过程中,合金各处的浓度不随时间而改变的扩散

2. 菲克第二定律

在扩散过程中,合金各处的浓度不仅随距离变化,而且还随时间发生变化,称之为非稳态扩散。

描述在非稳定状态扩散过程中各截面的浓度与距离和时间两个独立变量的关系的偏微分方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

如果扩散系数 D 与浓度 C 、距离 x 无关,则上式可写为: $\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$

3. 扩散应用举例

扩散第二定律是偏微分方程,不能直接应用,必须结合实际扩散过程,运用具体的起始条件和边界条件,求出其解后才能应用。

- (1) 铸锭(件)的均匀化退火
- (2) 低碳钢或低合金钢的表面渗碳
- (3) 钎焊、接触反应钎焊
- (4) 金属镀层

本节名校真题

一、名词解释:

菲克第二定律;(2010 河北工业大学)

二、论述:

试叙述铸锭在高温退火过程中能够实现成分均匀化的原理。(2010 河北工业大学)

三、简答题:

1. 写出菲克第一定律的数学表达式,说明其意义,简述影响扩散的因素。(2010 华南理工大学)

第三节 影响扩散的因素

本节常见题型包括名词解释、选择、填空题简答题和论述题。

※本章复习要点

重点掌握影响扩散的因素。

※本节重要考点

1. 重点掌握:掌握影响扩散的因素。
2. 理解:影响扩散因素的内在机制。

※考点精讲

1. 温度对扩散的影响

温度是影响扩散系数的最主要因素。扩散系数 D 与温度 T 的关系符合阿仑尼乌斯(Arrhenius)公式:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

随着温度的升高,扩散系数急剧增大。

原因:温度升高,原子通过能量起伏而越过势垒进行跃迁的几率增大。此外。温度升高,空位浓度急剧增大,有利于实现原子迁移。

2. 键能和晶体结构对扩散的影响

- (1) 原子间的结合能越大,扩散激活能就越大。高熔点金属具有较低的扩散系数。
- (2) 在致密度大的晶体结构中,原子扩散激活能较高,扩散系数较小。具有同素异构转变的金属,原子的扩散系数随晶体结构的改变会有明显变化,

(3)在某些晶体(如六方晶系)结构中,原子扩散还具有各向异性的特点

3. 固溶体类型对扩散的影响

不同类型的固溶体,溶质原子的扩散激活能不同。间隙原子的激活能都比置换原子的小,所以扩散速度也较大。

4. 晶体缺陷对扩散的影响

对一定的晶体结构,表面扩散最快,晶界次之,亚晶界又次之,晶内扩散最慢。一般的,空位和位错加速晶体中的扩散过程。位错密度增加,扩散速度加快。

原因:晶格发生畸变,能量较高,其扩散激活能较小

5. 化学成分对扩散的影响

(1)加入合金元素影响合金熔点时的情况

当加入合金元素使合金的熔点降低时,则该合金元素会使溶质或溶剂组元的扩散系数增加;反之,当加入合金元素使合金的熔点升高时,则该合金元素会使溶质或溶剂组元的扩散系数降低。

(2)合金元素对碳在 γ -Fe 中扩散系数的影响

其影响可分为以下三种情况:

1)形成碳化物的元素,如 W、Mo、Cr 等,由于它们和碳的亲合力较大,能够强烈阻止碳的扩散,因而降低碳的扩散系数。

2)不能形成碳化物,但易溶于碳化物中的元素,如 Mn 等,它们对碳的扩散系数影响不大。

3)不形成碳化物而溶于固溶体中的元素,如 Co、Ni、Si 等,其中两个提高碳的扩散系数,而 Si 降低碳的扩散系数。

本节名校真题

一、填空题:

_____是影响扩散系数的最主要因素。(2012 华南理工大学)

二、判断题:

1. 原子间的结合力越大,则扩散激活能越大。(2011 华南理工大学)

2. 间隙原子的扩散激活能比置换原子的小,所以扩散速度比较快。(2010 华南理工大学)

三、选择题:(2011 华南理工大学)

1. 原子越过能垒的激活能为 Q ,则扩散速率_____。

A. 随 Q 增加而减小

B. 随 Q 增加而增加

C. 与 Q 无关

四、试分析影响金属或合金中原子扩散的主要因素。(2011 河北工业大学)

五、碳在 α -Fe 和 γ -Fe 中的扩散系数那个大?为什么?渗碳一般选在 α -Fe 还是 γ -Fe 的温度区进行?为什么?(2012 青岛科技大学)

第九章 钢的热处理原理

第一节 概述

本节常见题型有名词解释、选择、填空题。

※本章复习要点

热处理的作用和条件,熟悉固态相变的特点和类型。

※本节重要考点

1. 熟悉:熟悉固态相变的特点和类型。
2. 了解:热处理的作用和条件。

※考点精讲

1. 热处理的目的与作用

热处理的概念:将钢在固态下加热到预定的温度,并在该温度下保温一段时间,然后以一定的速度冷却到室温的一种热加工工艺。

热处理的目的:通过改变钢的内部组织结构,以改变其性能。

热处理的作用:

(1) 适当的热处理可以显著提高钢的力学性能,大幅度延长机器零件的使用寿命,充分挖掘材料性能潜力,降低结构重量,节约材料和能源。

(2) 恰当的热处理可以消除铸、锻、焊等热加工工艺造成的各种缺陷,细化晶粒,消除偏析,降低应力,使钢的组织 and 性能更加均匀。

(3) 热处理是机器零件加工工程中的重要工序。例如用 40Cr 钢制造齿轮,其加工工艺路线为:下料(棒料)→锻造毛坯→热处理 1→粗加工齿形→热处理 2→精加工齿形→热处理 3→磨削。

例如用高碳合金钢制造刀具,其加工工艺路线为:铸件→锻造毛坯→热处理 1→切削加工成成品形状→热处理 2

2. 钢为什么可以进行热处理

(1) 哪些金属材料可以进行热处理? 原则上只有在加热或冷却时发生溶解度显著变化,或者发生类似纯铁的同素异构转变,即有固态相变发生的合金才能进行热处理。

(2) 钢在加热和冷却过程会发生组织相变

共析钢加热至相图 PSK 线(A₁线)以上全部转变为奥氏体。亚、过共析钢必须加热至 GS 线(A₃线)或 ES 线(A_{cm}线)以上才能转变为单相奥氏体。

共析钢从奥氏体状态冷却至 A1 线以下,将发生共析转变,全部形成珠光体;亚、过共析钢从奥氏体状态冷却至 A3 线或 Acm 线时,则分别从奥氏体中析出铁素体和渗碳体,继续冷却至 A1 线时,则剩余奥氏体转变为珠光体。所以钢在通过上述临界点发生固态相变,能进行热处理。

(3) 钢热处理时的实际相变温度

A1 线, A3 线和 Acm 线是钢在缓慢加热和冷却时组织转变的临界点,而实际转变温度要偏离平衡的临界点。通常把加热时的实际临界温度标以字母“c”,如 Ac_1 , Ac_3 和 $Accm$; 而把冷却时的实际临界温度标以字母“r”,如 Ar_1 , Ar_3 和 $Arcm$ 。

3. 固态相变的特点

固态相变与液态结晶的相同点:

- 1) 相变都包含了形核和核长大两个基本过程;
- 2) 相变的驱动力都是新、旧两相之间的自由能差。

但固态相变由固相转变为固相,新、旧两相都是晶体,因此与结晶有着显著不同的特点。

(1) 相变阻力大

固态相变时,由于新、旧两相比体积不同,母相转变为新相时要发生体积变化,或者由于新、旧两相界面不匹配而引起晶格畸变。因此导致弹性应变能的额外增加。而液态结晶时能量的增加只有表面能一项。

固态相变时,系统总的自由能变化为:

$$\Delta G = -V \Delta G_V + S\sigma + V\omega$$

式中: ω 为固态相变时产生的单位体积应变能; σ 表示新、旧相界单位面积的界面能。

与液体金属结晶相比,由于应变能的作用,临界晶核半径和临界形核功较大,固态相变阻力增大,所需要的过冷度也大得多。此外,固相扩散时原子的扩散更为困难,这是固态相变阻力大的另一个原因。

(2) 固态相变时,为了减少新、旧两相之间的界面能,新相晶核与母相之间往往存在一定的晶体学位向关系。

(3) 母相晶体缺陷对相变起促进作用

固态相变时,新相往往优先在母相中的各种晶体缺陷处(如晶界、相界、位错、空位等)形成。试验表明,母相晶粒越细,晶界越多,晶内缺陷越多,则转变速度越快。

(4) 易于形成过渡相

过渡相是一种亚稳定相,其成分和结构介于新相和母相之间(或更接近母相)。过渡相是为了克服相变阻力而形成的一种协调性中间转变产物。

4. 固态相变的类型

根据固态相变过程中生核和长大的特点,可将固态相变分为三类。

(1) 扩散型相变。在这类相变过程中,新相的形核和长大主要依靠原子进行长距离的扩散,或者说,相变是依靠相界面的扩散移动而进行的。相界面是非共格的。奥氏体转变、珠光体转变、纯金属的同素异构转变、固溶体的多形性转变以及脱溶转变等等都属于这一类相变。

(3) 介于扩散型和无扩散型相变之间的一种过渡型转变。钢中的马氏体转变属于这一类相变。这类相变接近于马氏体相变, 铁素体晶格改组是按照切变机构进行的, 同时在相变过程中还伴随着碳原子的扩散。

一、选择题

A. 扩散 B. 切变 C. 过渡

(1) 在相图中标出各区的组织组成物;

(2) 标出 A_1 、 A_3 、 A_{cm} 线的位置。

三、什么钢能通过热处理实现强化？（2010 河北工业大学）

本节常见题型有名词解释、选择、填空题和简答题。

※本章复习要点

※本节重要考点

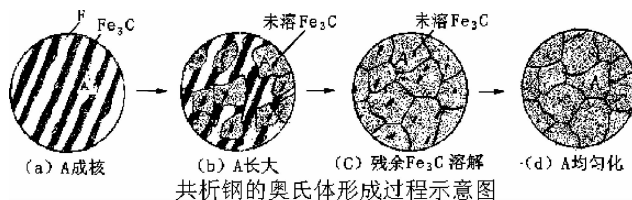
1. 重点掌握:奥氏体晶粒对钢在室温下组织与性能的影响
2. 掌握:合金元素与原始组织对奥氏体化过程的影响规律。
3. 熟悉:共析钢在加热中奥氏体的形成过程,即奥氏体的形核、长大、残余奥氏体溶解。
4. 理解:影响奥氏体晶粒大小的因素。

※本节重要概念

本质晶粒度,奥氏体化。

※ 考点精讲

1. 共析钢奥氏体的形成过程



(1) 奥氏体形核: 奥氏体的晶核优先在铁素体与渗碳体的界面上形成。

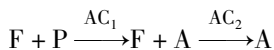
(2) 奥氏体晶核长大: 奥氏体晶核形成以后, 依靠铁、碳原子的扩散, 使铁素体不断向奥氏体转变和渗碳体不断溶入到奥氏体中去而进行的。

(3) 残留渗碳体的溶解: 铁素体全部消失以后, 仍有部分剩余渗碳体未溶解, 随着时间的延长, 这些剩余渗碳体不断地溶入到奥氏体中去, 直至全部消失。

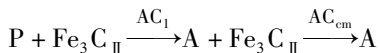
(4) 奥氏体均匀化: 渗碳体全部溶解完毕时, 奥氏体的成分是不均匀的, 只有延长保温时间, 通过碳原子的扩散才能获得均匀化的奥氏体。

2. 非共析钢奥氏体的形成过程

(1) 亚共析钢的加热过程:



(2) 过共析钢的加热过程:



3. 影响奥氏体形成过程的因素

(1) 温度, 其作用最为显著。加热温度提高, 孕育期及转变完成所需时间显著缩短, 即奥氏体的形成速度快。在较高温度下短时间加热和较低温度下长时间加热都可以得到相同的奥氏体状态。

(2) 原始组织。原始组织中两相界面越多, 奥氏体化过程越快。

(3) 化学成分

1) 含碳量。含碳量越高, 奥氏体化速度越快。原因: 其一, 含碳量高, 原始组织中渗碳体数量多, 铁素体与渗碳体的相界面, 奥氏体形核率增大; 其二, 含碳量高, 碳在奥氏体中的扩散速度增大。

2) 碳化物形成元素会减慢奥氏体化过程, 非碳化物形成元素 Ni、Co 等会加快奥氏体化过程, Si、Al、Mn 等影响不大

4. 奥氏体晶粒大小及其影响因素

(1) 晶粒度

晶粒度: 晶粒大小的量度, 以单位面积内晶粒的个数来描述。生产中通常以晶粒度级别数 G 表示材料的平均晶粒度, G 与晶粒尺寸有如下关系:

$$N = 2^{G-1}$$

式中, N 表示在 100 倍下每平方英寸 (645.16mm²) 面积内的晶粒数。 $G < 5$ 级为粗晶粒, $G \geq 5$ 为细晶粒。

(2) 奥氏体晶粒度

刚刚完成奥氏体化的晶粒大小称为起始晶粒度; 在具体的加热条件下获得的晶粒大小称为实际晶粒度; 在规定的加热条件下 (930℃ ± 10℃, 保温 5 ~ 8h) 获得的晶粒大小称为本质晶粒度。

(3)影响奥氏体晶粒大小的因素

1)加热温度与保温时间:温度越高,时间越长,晶粒越粗大,因为这与原子扩散密切相关。

2)加热速度:温度相同时,加热速度越快,奥氏体的实际形成温度越高,形核率的增加大于长大速度,可获得细小的奥氏体晶粒。

3)钢中的化学成分。

①含碳量:碳全部溶于奥氏体时,随奥氏体中含碳量的增加,碳在奥氏体中的扩散速度及铁的自扩散速度增大,晶粒长大倾向增大。但当含碳量超过一定量以后,碳能以未溶碳化物(第二相)的形式存在,晶粒长大倾向反而减小。

②其他化学元素:钢中 Ti、V、Zr、Nb 等强碳化物形成元素,能形成高熔点的弥散碳化物和氮化物,分布于晶界,阻碍晶界迁移,使奥氏体晶粒细小。Mn、P、C、N 等溶入奥氏体后削弱了铁原子结合力,加速铁原子的扩散,使奥氏体晶粒粗大。

4)钢的原始组织。

一般的,原始组织越细,碳化物弥散度越大,则奥氏体晶粒细小。相同条件下,粒状珠光体比片状珠光体易于粗化,因为后者表面积大,溶解快,奥氏体形成速度快,奥氏体形成后过早地进入晶粒长大阶段。

本节名校真题

一、名词解释:

本质晶粒度(2012 青岛科技大学)

二、填空题:

1. 共析钢中奥氏体的形成由下列四个基本过程组成即 _____、_____、_____ 和 _____。(2011 河北工业大学)

2. 合金钢热处理时的加热目的是为了获得 _____、_____ 的奥氏体组织。(2012 华南理工大学)

三、选择题:

1. 对于亚共析钢,适当的淬火温度一般是 _____,淬火后的组织为均匀的马氏体。(2011 华南理工大学)

1. $Ac_1 + 30 \sim 50^\circ\text{C}$

B. $Ac_m + 30 \sim 50^\circ\text{C}$

C. $Ac_3 + 30 \sim 50^\circ\text{C}$

2. 马氏体片的粗细,主要取决于 _____。

A. 淬火冷却速度

B. 母相奥氏体的晶粒度

C. M_s 点的高低

四、简答题

1. 共析钢加热时,珠光体向奥氏体转变分为那几个阶段?并绘图说明奥氏体长大机制。(2012 青岛科技大学)

2. 简述奥氏体晶粒对钢在室温下组织与性能的影响. (2010 华南理工大学)
3. 简述共析钢在加热时奥氏体的基本形成过程. (2010 华南理工大学)

第三节 钢在冷却时的转变

本节常见题型有名词解释、选择、填空题和简答题。

※本章复习要点

掌握钢冷却过程中的四大转变(珠光体转变、贝氏体转变和马氏体转变)和两条曲线(TTT 曲线和 CCT 曲线)。

※本节重要考点

1. 重点掌握:钢在等温冷却过程中的四大转变(珠光体转变、贝氏体转变和马氏体转变)的过程和产物的组织结构与性能。
2. 掌握:钢在连续冷却过程中的转变特点。
3. 理解:TTT 曲线和 CCT 曲线的区别。

※本节重要概念

过冷奥氏体,残余奥氏体,马氏体,贝氏体,珠光体。

※考点精讲

1. 钢的冷却方式

热处理时常用的冷却方式有两种:

- 一是等温冷却;
- 二是连续冷却

2. 过冷奥氏体等温冷却曲线的绘制与分析

通常将处于 A_1 以下温度尚未发生转变的奥氏体称为过冷奥氏体. 钢在冷却时的组织转变实质上是过冷奥氏体的组织转变。

(1) 过冷奥氏体等温冷却曲线的绘制

1) 等温冷却试验:

- a. 首先将若干薄圆片状试样放入 A 炉中,在 A_1 以上温度进行奥氏体化;
- b. 将奥氏体化后的试样迅速放入 B 炉中保温,炉温低于共析温度;
- c. 依据试样保温时间的差异,分别从 B 炉中取出试样,置于水中快冷;
- d. 磨制金相试样,并观察显微组织。

2) 在不同温度重复上述等温转变试验,根据试验结果绘制出奥氏体钢的等温冷却曲线。

(2) 过冷奥氏体等温冷却曲线曲线分析

曲线的左边一条线为过冷奥氏体转变开始线;右边一条线为过冷奥氏体转变终了线。该曲线下

部还有两条水平线,分别表示奥氏体向马氏体转变的开始温度 M_s 线和转变结束温度 M_f 线。

过冷奥氏体等温冷却曲线形似“C”字,俗称 C 曲线,反应了“温度——时间——转变量”的关系,所以 C 曲线又称为 TTT 图

转变温度/ $^{\circ}\text{C}$	组织名称(符号)	扩散类型
$A_1 - 650$	珠光体(P)	扩散型(C、Fe 均扩散)
$650 - 600$	索氏体(S)	扩散型(C、Fe 均扩散)
$600 - 550$	屈氏体(T)	扩散型(C、Fe 均扩散)
$550 - 350$	上贝氏体(B _上)	半扩散型(仅 C 扩散)
$350 - M_s$	下贝氏体(B _下)	半扩散型(仅 C 扩散)
$M_s - M_f$	马氏体(M)	非扩散型(C、Fe 均不扩散)

3. 影响过冷奥氏体等温转变的因素

(1) 奥氏体成分的影响

1) 含碳量的影响

① 亚过析钢 C 曲线的上部分多出一条先共析相(F)析出线. 奥氏体的 $C \uparrow$, C 曲线右移。

② 过析钢 C 曲线的上部分多出一条先共析相 Fe_3C 析出线. 部分 A 化时, $C \uparrow$, C 曲线左移。

2) 合金元素的影响

除 Co 和 Al 以外的所有合金元素,当其溶入奥氏体中后,都增大过冷奥氏体的稳定性,使 C 曲线右移,并使 M_s 点降低. 其中 Mo、W、Mn、Ni 影响明显, Si、Al 影响不明显。

Cr、Mo、W、V、Ti 等元素溶入奥氏体后,还会改变 C 曲线的形状, C 曲线分离成上下两部分,形成了两个“鼻子”。

(2) 奥氏体的组织状态的影响

1) 奥氏体晶粒越细小,单位面积晶界越多,使铁素体或渗碳体的形核率增多,降低奥氏体的稳定性, C 曲线左移。

2) 同样加热条件下,不均匀的奥氏体可以促进奥氏体分解,使 C 曲线左移。铸态原始组织不均匀,存在成分偏析,而经轧制后,组织和成分均匀。

(3) 应力和塑性变形的影响

1) 过冷奥氏体呈拉应力状态时, C 曲线左移,呈压应力状态时, C 曲线右移. 原因:拉应力状态时, C、Fe 原子扩散加剧,铁晶格改组容易;压应力状态时,情况相反。

2) 对奥氏体进行塑性变形也有加速奥氏体转变的作用. 原因:

一是点阵畸变加剧和位错密度增高,有利于原子扩散和晶格改组;

二是形变有利于碳化物弥散析出,使奥氏体中碳和合金元素贫化,因而促进奥氏体的转变。

4. 珠光体转变

珠光体转变是高温扩散型转变,通过形核和长大过程完成。根据奥氏体化温度和奥氏体化程度

不同,过冷奥氏体可以形成片状珠光体和粒状珠光体两种组织形态。

(1) 片状珠光体的形成、组织和性能

形成:有分片形成何分枝形成两种机制。

组织:随着形成温度的降低,珠光体的片层间距减小

性能:珠光体的片层间距小,强度、硬度高,塑、韧性好

(2) 粒状珠光体的形成、组织和性能

1) 组织形态:粒状珠光体组织是渗碳体呈颗粒状分布在连续的铁素体基体上。

2) 形成:通过控制钢加热时的奥氏体化程度,使奥氏体内残存大量未溶的渗碳体晶核,将奥氏体过冷到 A_1 以下,在过冷度较小时就能在奥氏体晶粒内形成大量均匀弥散的渗碳体晶核,每个渗碳体晶核在独立长大的同时,必然在其周围母相奥氏体贫碳而形成铁素体,从而直接形成粒状珠光体。除了由过冷奥氏体直接分解而成外,也可以将(片状珠光体 + 网状渗碳体)组织通过球化退火工艺获得粒状珠光体,还可以由淬火组织回火形成粒状珠光体。

3) 性能:与片状珠光体相比,粒状珠光体的硬度和强度较低,塑性和韧性较好。在硬度相同的条件下,粒状珠光体的屈服强度和塑性均较片状珠光体好。此外,粒状珠光体的冷变形性能、机加工性能和淬火工艺性能也均比片状珠光体好。

5. 马氏体转变

钢从奥氏体状态快速冷却,抑制其扩散性分解,在较低温度下(低于 M_s)发生的无扩散型相变称作马氏体相变。

(1) 马氏体的晶体结构、组织和性能

1) 晶体结构。碳在 $\alpha - \text{Fe}$ 中过饱和的间隙固溶体。马氏体一般有两种类型的结构:一种是体心立方,出现在含碳极微的低碳钢或无碳合金中;一种是体心正方,出现在含碳较高的钢中。

2) 组织形态及其精细结构

① 板条状马氏体。它是低碳钢($<0.2\%$)形成的一种马氏体组织,也称低碳马氏体。其显微组织是由成群的板条组成。板条状马氏体内有大量的位错,这些位错分布不均匀,形成胞状亚结构,称为位错胞。因此,板条状马氏体又称“位错马氏体”。

② 片状马氏体。它是高碳钢($>1.0\%$)、高镍不锈钢淬火时形成的一种马氏体组织。在光学显微镜下呈针状或竹叶状,故片状马氏体又称针状马氏体或竹叶状马氏体。片状马氏体组织内存在大量显微裂纹。TEM 表明,片状马氏体内部的亚结构主要是孪晶,又称为孪晶马氏体。

3) 性能

马氏体力学性能的显著特点:高硬度、高强度。马氏体的硬度随其中含碳量的增加而增加。合金元素对马氏体的硬度影响不大。原因:固溶强化(间隙原子应力场与位错交互作用),相变强化(位错密度增大),时效强化(合金元素在晶体缺陷处扩散偏聚或析出,钉扎位错)和细晶强化。

马氏体的塑性、韧性取决于它的亚结构。位错马氏体具有很高的强度和韧性。孪晶马氏体具有

高的强度,但韧性很差,其性能特点是硬而脆。

(2) 马氏体转变的特点

1) 无扩散性

相变过程成分不变,点阵的重构是由参与转变的所有原子集体的、有规律的、近程的迁动(不超过一个原子间距)完成的。转变后相邻原子的相对位置不变。

2) 具有切变共格性和特定的惯习面

马氏体相变产生点阵均匀切变,造成结构变化,试样表面浮凸现象,马氏体和母体之间的界面为共格界面,又称惯习面。马氏体转变时,惯习面是尺寸、形状不变的面,也不转动。换言之,马氏体转变是新相在母相特点的晶面上形成,并以母相的切变来保持共格关系的相变过程。

3) 具有晶体学位向关系。

由于马氏体转变时新相和母相始终保持切变共格性,因此新相与母相之间存在一定的结晶学关系。

4) 马氏体具有内部亚结构。除了点阵切变外,马氏体相变还要发生点阵不变切变,依靠滑移或孪生完成,在马氏体内部形成位错或孪晶亚结构。

5) 马氏体转变是在一个温度范围内进行的。

尺寸大于临界半径的马氏体晶核形成后,迅速长大,当长大到一定尺寸后,共格关系破坏,长大停止。因此,马氏体的转变速率取决于其形核率。由于过冷度越大,临界晶核越小,只有进一步降温才能使更小的核胚成为晶核并长成马氏体。当 M_f 低于室温,则淬火冷却到室温将保留相当数量未转变的奥氏体,称之为残余奥氏体。

奥氏体中的碳含量越多, M_s 和 M_f 点越低,则残余奥氏体量越多。

6) 马氏体转变的可逆性。

在某些铁合金、镍与其他有色金属中,奥氏体冷却变为马氏体,重新加热时已经形成的马氏体又能无扩散地转变为奥氏体。这就是马氏体转变的可逆性。但是在一般碳钢中不发生按马氏体转变机构的逆转变,因为在加热时马氏体早已分解为铁素体和碳化物。

6. 贝氏体转变

(1) 贝氏体的组织形态

1) 上贝氏体—— $600 \sim 350^\circ\text{C}$ 形成的贝氏体。其光学显微镜下呈羽毛状;在电子显微镜下,它由含碳过饱和的条状铁素体和铁素体条间的断续的、短杆状渗碳体组成。铁素体和渗碳体分布具有明显的方向性。铁素体的形态和亚结构与马氏体相似,但其位错密度较低。随着形成温度的下降,上贝氏体中铁素体条宽度变窄,渗碳体细化且弥散度增大。

2) 下贝氏体—— $350^\circ\text{C} \sim M_s$ 形成的贝氏体。其光学显微镜下呈黑针状;在电子显微镜下,它由含碳过饱和的片状铁素体和其内部析出的细片状 ϵ -碳化物 (Fe_3C) 组成。其中铁素体的形态与片状马氏体相似,其亚结构的位错密度比上贝氏体铁素体的高,但没有孪晶亚结构存在。

(2) 贝氏体的性能

- 1) 上贝氏体: 上贝氏体中碳化物较粗大, 且分布不均匀, 铁素体条间易产生裂纹, 且易扩展。因此脆性大。
- 2) 下贝氏体: 下贝氏体中铁素体细小而均匀分布, 位错密度很高, 在铁素体内部又沉淀析出细小、多量、弥散的 ϵ -碳化物。因此, 下贝氏体较不但强度高、而且韧性也很好, 即具有良好的综合力学性能。

(3) 贝氏体转变的特点

1) 贝氏体转变是一个形核与长大过程。贝氏体中铁素体晶核一般在奥氏体晶界或晶粒内部贫碳区形成并长大, 在其长大的同时, 在铁素体条间或铁素体内部沉淀析出碳化物。故贝氏体的转变速度受碳的扩散所控制。通常, 上、下贝氏体的转变速度分别取决于碳在奥氏体和铁素体中的扩散速度。

2) 贝氏体中铁素体的形成是按切变机制进行的。贝氏体中铁素体和母相奥氏体保持共格关系并沿奥氏体特定的晶面依靠切变而长大。贝氏体中铁素体与母相奥氏体也严格的结晶学位向关系。此外, 上、下贝氏体中渗碳体与铁素体、渗碳体与母相奥氏体也遵循一定的结晶学位向关系。

3) 贝氏体中碳化物的形成是扩散机制进行的, 其分布形态与奥氏体的转变温度有关。

① 当转变温度较高时, 碳原子扩散能力较强, 在贝氏体中铁素体形成的同时, 碳原子由铁素体通过铁素体-奥氏体界面向奥氏体进行充分扩散, 从而得到无碳化物贝氏体。

② 当转变温度较低时, 铁素体中碳原子通过铁素体-奥氏体界面向奥氏体中的扩散变得不充分, 由于碳在铁素体中的扩散速度大于奥氏体中扩散速度, 因而当铁素体条间奥氏体的碳浓度富集到一定程度时便析出渗碳体, 得到在铁素体条间分布断续渗碳体的羽毛状贝氏体。

③ 当转变温度更低时, 碳原子在奥氏体中的扩散更加困难, 而在铁素体中的扩散仍可进行, 因而使碳原子只能在铁素体内某些特定晶面上偏聚, 进而析出 ϵ -碳化物, 得到针状的下贝氏体。

7. 过冷奥氏体连续冷却转变图

(1) 共析钢连续冷却转变 CCT 曲线特点:

- ① 转变时间滞后, 转变温度降低;
- ② 转变产物不均匀;
- ③ 只有 P 转变区和 M 转变区, 无 B 转变区。

临界冷却速度: 是指使奥氏体在冷却过程中直接转变成马氏体而不发生其它转变的最小冷却速度, 即临界淬火速度

(2) 亚共析钢连续冷却转变

与共析钢 CCT 相比, 出现了先共析铁素体析出区域和贝氏体转变区域, M_s 线右端下移。

本节名校真题

一、名词解释

1. 过冷奥氏体 (2011 华南理工大学)
2. 残余奥氏体 (2012 南京航空航天大学)

二、填空题:

1. 当钢中发生奥氏体向马氏体转变时, 原奥氏体中碳含量越高, 则 M_s 点越_____, 转变后的残

余奥氏体量就越_____。(2011 河北工业大学)

2. 马氏体按其亚结构主要分为_____和_____两种。(2009 青岛科技大学)

3. 马氏体是碳在_____中的过饱和固溶体,马氏体相变属于_____相变。(2012 青岛科技大学)

4. 过冷奥氏体转变为珠光体型的组织包括_____,_____,_____三种。(2012 青岛科技大学)

三、选择题:

1. 马氏体相变时,新相往往在母相的一定晶面开始形成,这个面成为_____。(2011 河北工业大学)

A. 惯习面 B. 孪晶面 C. 密排面

2. 强烈阻止奥氏体晶粒长大的合金元素是_____。(2012 南京航空航天大学)

A. Ni、Si、Cu

B. Ti、V、Nb

C. Mn、Co

D. P、N、Cu

3. 关于 CCT 曲线,错误说法是_____。(2010 华南理工大学)

A. CCT 曲线是制定钢热处理加热规范的依据

B. CCT 曲线是制定钢热处理冷却规范的依据

C. 从 CCT 曲线可以获得钢的临界冷却速度

D. 根据 CCT 曲线可以估计淬火后钢件的组织和性能

四、简述钢中板条马氏体和片状马氏体的显微形貌特征和亚结构,并说明其机械性能上的差别。

(2011 青岛科技大学)

五、分析马氏体高强度、高硬度的本质原因。(2011 河北工业大学)

六、试说明碳钢珠光体、贝氏体、马氏体的 α 相有何异同。(2009 青岛科技大学)

第四节 淬火钢在回火时的转变

本节常见题型有名词解释、选择、填空题和简答题。

※本章复习要点

熟悉淬火钢在回火时的组织转变过程及性能的变化,了解回火脆性的类别、特点及形成机制。

※本节重要考点

1. 重点掌握:淬火钢在回火时的组织转变过程及性能的变化。

2. 掌握:回火脆性的类别、特点及形成机制

3. 理解:回火索氏体与索氏体的区别;回火马氏体与下贝氏体区别

※本节重要概念

第一类回火脆性,第二类回火脆性。

※ 考点精讲

1. 淬火钢回火的目的与作用

定义:回火是把淬火后的钢件,重新加热到 A_1 以下某一温度,经保温后空冷至室温的热处理工艺。

为什么要对淬火钢进行回火?

①淬火组织不稳定. 淬火钢的组织主要是 M 或 $(M + A \text{ 残})$. M 和 $A \text{ 残}$ 在室温下都处于亚稳定状态, M 处于碳过饱和状态, $A \text{ 残}$ 处于过冷状态, 它们有向 $(F + \text{碳化物})$ 的稳定状态转化的趋势. 但在室温下, 原子扩散能力很低. 这种转变很困难. 回火则促进组织转变。

②性能不能满足使用要求. 硬而脆, 残余应力很大。

2. 淬火钢的回火转变及其组织

(1) 马氏体中碳的偏聚(室温 ~ 100℃ 回火)

马氏体中的过饱和碳原子偏聚在位错线附近的间隙位置, 形成碳的偏聚区, 降低 M 的弹性应变能。

(2) 马氏体分解(100 ~ 250℃ 回火)

偏聚区的碳原子发生有序化, 继而转变为 $\epsilon - \text{Fe}_x\text{C}$ 碳化物. 马氏体分解后形成的低碳 α 相和 $\epsilon - \text{Fe}_x\text{C}$ 碳化物组成的双相组织称为回火马氏体。

(3) 残余奥氏体的转变(200 ~ 300℃ 回火)

残余奥氏体随淬火加热时奥氏体中碳和合金元素的含量的增加而增加。高碳钢淬火后于 200 ~ 300℃ 回火时, 马氏体继续分解, 同时残余奥氏体转变为过饱和固溶体 α 与 $\epsilon - \text{Fe}_x\text{C}$ 碳化物, 得到回火马氏体组织。

(4) 碳化物的转变(250 ~ 400℃)

M 分解及 $A \text{ 残}$ 转变形成的 $\epsilon - \text{碳化物}$ 是亚稳定的过渡相。当回火温度升高至的 250 ~ 400℃ 时, 会形成比 $\epsilon - \text{碳化物}$ 更稳定的碳化物, 一种是 $X - \text{碳化物}$, 即 Fe_5C_2 , 具有单斜结构; 另一种是更稳定的 $\theta - \text{碳化物}$, 即 Fe_3C . 在 300 ~ 400℃ 时, $\epsilon - \text{碳化物}$ 与基体的共格关系破坏, 渗碳体脱离铁素体而析出。

(5) 渗碳体的聚集长大和铁素体的回复、再结晶

400 ~ 500℃ 回火时, 脱离铁素体的渗碳体开始明显地聚集长大, 片状渗碳体转变为细粒状渗碳体; 铁素体相发生明显回复。这种由回复了的铁素体和极细粒状渗碳体的机械混合物称作回火屈氏体。

500℃ ~ 650℃ 回火时, 细粒状渗碳体迅速聚集并粗化; 铁素体相发生再结晶。这种由回复或再结晶了的铁素体和粒状渗碳体的机械混合物称作回火索氏体。

3. 淬火钢的回火时性能的变化

(1) 碳钢在回火时力学性能变化的总趋势: 随着回火温度升高, 硬度不断下降, 强度不断下降, 而塑性不断升高。

200 ~ 300℃ 较低温度回火时, 内应力的消除, 仍能保证高的强度和耐磨性; 300 ~ 400℃ 中温回火时, 弹性极限最高; 500 ~ 600℃ 高温回火时, 塑性达到较高值, 而且保持相当高的强度, 可以获得良好的综合力学性能。

(2) 由于合金元素可使钢的各种回火温度范围向高温推移,合金钢比碳钢具有更高的抵抗回火软化的能力,即回火抗力高. 与相同含碳量的碳钢相比,在高于 300℃ 回火时,在相同回火温度和回火时间情况下,合金钢具有较高的强度和硬度. 反之,为了得到相同的强度和硬度,合金钢可以在更高温度下回火,这又有利于钢的韧性和塑性的提高。

4. 回火脆性

有些钢在一定温度范围内回火时,其冲击韧性显著下降,这种脆化现象称为回火脆性。

(1) 第一类回火脆性——在 250 ~ 400℃ 回火时出现的脆性,也叫低温回火脆性。为防止低温回火脆性,通常的办法是避免在脆化温度范围内回火。

(2) 第二类回火脆性——钢在 450 ~ 650℃ 回火时出现的脆性,又叫高温回火脆性,主要出现在合金结构钢中。

防止高温回火脆性的方法是:

① 加热后快冷;

② 在钢中加入 Mo、W 等合金元素。

高温回火脆性具有可逆性。

5. 淬火后的回火产物与奥氏体直接分解产物的性能比较

(1) 回火索氏体和索氏体

相同点:都是铁素体 + 碳化物的珠光体型组织。

不同点:回火索氏体中的碳化物呈颗粒状,而索氏体中的碳化物呈片状。碳化物呈颗粒状的组织可使钢的力学性能得到改善,硬度相同时,两类组织的抗拉强度接近,但回火索氏体组织的屈服强度、塑性均比索氏体高。

(2) 下贝氏体和回火马氏体

相同点:(铁素体 + ϵ - 碳化物)两相组织

不同点:下贝氏体是奥氏体直接经过等温淬火直接分解的产物,而回火马氏体是淬火钢的低温回火产物. 对于具有回火脆性的钢种,当强度相同时,下贝氏体的冲击韧度显著高于回火马氏体. 工程上采用等温淬火取代淬火 + 低温回火

本节名校真题

一、名词解释:

1. 钢的回火脆性 (2012 华南理工大学)
2. 第二类回火脆性. (2009 青岛科技大学)

二、填空题:

淬火钢回火时其组织转变包括_____、_____、_____、_____。(2007 青岛科技大学)

三、简答题：

1. 试从强化机制分析说明提高钢强度最重要的方法是淬火和随后的回火处理。(2012 南京航空航天大学)
2. 粒状珠光体是如何形成的？为什么许多重要的零件(如:模具)在最终热处理前,要获得这种组织？(2010 河北工业大学)

第十章 钢的热处理工艺

第一节 钢的退火与正火

本节常见题型有名词解释、选择、填空题和简答题。

※本章复习要点

掌握钢的退火和正火的目的、工艺制度、适用钢种及应用。

※本节重要考点

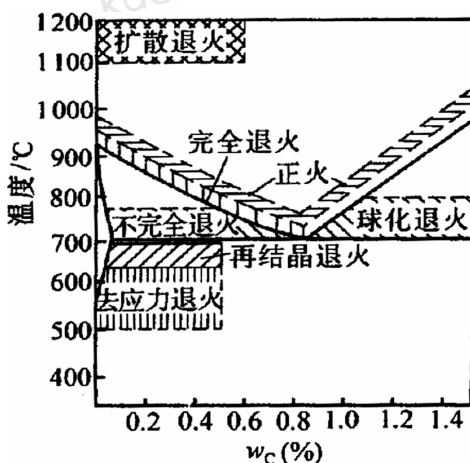
1. 重点掌握:掌握钢的退火的类别、目的、工艺制度、适用钢种及应用。
2. 掌握:钢的正火的目的、工艺制度、适用钢种及应用。
3. 理解:退火与正火的区别

※本节重要概念

不完全退火,球化退火,伪共析。

※考点精讲

1. 完全退火的目的及工艺



- (1) 目的:细化晶粒,均匀组织,消除内应力,降低硬度,改善切削加工性能. 获得($\alpha + P$)组织
- (2) 应用:亚共析钢(0.3% ~ 0.6%)铸件、锻(轧)件、焊件.
- (3) 工艺制度:加热到 Ac_3 以上 $20 \sim 30^\circ C$;保温足够时间;随炉缓冷至 $550^\circ C$ 空冷。
(保温目的:温度均匀,组织转变充分)

2. 不完全退火的目的及工艺

- (1) 目的:不改变原 F 组织,细化 P 晶粒,降低硬度,消除内应力,改善切削性能. 缩短生产周期.

(2)应用:亚共析钢($0.3\% \sim 0.6\%$)

铸件、锻(轧)件、焊件.

(3)工艺制度:加热到 $Ac_1 \sim Ac_3$ 之间;经保温后缓慢冷却。

3. 球化退火的目的及工艺

(1)目的:将钢中片状或网状碳化物球化,获得粒状珠光体组织,以降低硬度,改善切削性能,提高塑性韧性,为淬火作组织准备.

(2)应用:共析钢、过共析钢及合金钢的锻件、轧件等.

(3)工艺制度:加热到 $Ac_1 + 20 \sim 30^\circ\text{C}$; 保温适当时间后随炉冷却

4. 扩散退火的目的及工艺

(1)目的:改善或消除钢中枝晶偏析,使成分均匀化.

(2)应用:合金钢铸锭及大型铸钢件或铸件.

(3)工艺制度:加热到 Ac_3 或 $Accm + 150 \sim 300^\circ\text{C}$; 长时间保温后随炉冷却.

5. 去应力退火和再结晶退火

(1)去应力退火

1)目的:消除残余应力,提高尺寸稳定性,防止工件变形和开裂.

2)应用:铸、锻、焊、冷压件及机加工件.

3)工艺制度:加热到 A_1 以下温度(一般 $500 \sim 650^\circ\text{C}$), 保温一定时间, 缓冷至 200°C 空冷.

(2)再结晶退火

1)目的:将金属中变形晶粒变成细小的等轴晶,以消除加工硬化,提高塑性.

2)应用:既可作为钢材或其他合金多道冷变形之间的中间退火,也可作为冷变形钢材或其他合金成品的最终热处理.

3)工艺制度:加热到再结晶温度,保温一定时间后空冷

6. 正火的目的及工艺

(1)工艺制度:通常在 Ac_3 或 $Accm + 30 \sim 50^\circ\text{C}$, 保温以后再空气中冷却。对于亚共析钢,正火与完全退火的加热温度相近。

(2)组织特征:与完全退火相比,由于冷却速度大,转变温度较低,故晶粒细小,组织均匀。当含碳量为 $0.6 \sim 1.4\%$ 时,不出现先共析相 F , 只有伪共析体或细珠光体(或称索氏体, S); 当含碳量小于 0.6% 时,组织为 $S +$ 少量 α 。

正火的实质是完全奥氏体化 + 伪共析转变。

(3)性能特点:与完全退火相比,强度、硬度较高。

(4)应用

1)对于低碳钢和低合金钢,通常采用正火代替退火,对一些受力不大、性能要求不是很高的结构

件,采用正火代替调质,作为零件的最终热处理。原因:

- ①用正火可以细化晶粒,提高低碳钢的强度和韧性;
- ②用正火可以防止低碳钢沿晶界析出游离三次渗碳体,从而提高冲压件的冷变形能力;
- ③用正火可以提高低碳钢的硬度,从而改善低碳钢的切削加工性能.
- ④正火可以消除热加工件的魏氏组织、粗大组织、带状组织及内应力,为最终热处理提供合适的组织状态

2) 对于 0.25 ~ 0.5% 的中碳钢,也可用正火代替退火。原因:

- ①虽然接近上限的中碳钢正火后硬度偏高,但尚能切削加工;
- ②正火成本低;
- ③生产率高。

3) 对于 0.75% 以上的高碳钢或工具钢,采用正火能够消除钢中的网状渗碳体,为球化退火做好组织准备。

本节名校真题

一、名词解释:

- 1. 不完全退火
- 2. 伪共析(2012 江苏大学)

二、填空题

- 1. 为获得良好的切削加工性,过共析钢的预先热处理采用_____,获得_____组织。(2011 华南理工大学)
- 2. 正火的实质是_____加_____转变。(2012 江苏大学)
- 3. 常规热处理工艺包括_____,_____,_____,_____。(2009 青岛科技大学)
- 4. 退火的主要目的是_____,_____和_____。(2010 华南理工大学)

三、选择题:

完全退火主要应用于_____。(2013 哈尔滨工业大学)

- A. 亚共析钢
- B. 共析钢
- C. 过共析钢

四、简答题

- 1. 比较钢的正火和完全退火工艺。(2012 江苏大学)
- 2. 简述钢的正火及目的,举例说明。(2010 华南理工大学)

第二节 钢的淬火与回火

本节常见题型选择、填空题、简答题和综合分析题。

※本章复习要点

掌握钢的淬火、回火的工艺特点、适用钢种和最终组织。

※本节重要考点

1. 掌握:钢的淬火、回火的类别、工艺特点、适用钢种和最终组织。

2. 理解:淬透性与淬硬性

※本节重要概念

淬硬性,淬透性,调质处理。

※考点精讲

1. 钢的淬火工艺

淬火是将钢加热到 A_{c1} 或 A_{c3} 以上温度并保温,出炉快速冷却,使奥氏体转变成马氏体的热处理工艺。经过退火或正火的工件只能获得一般的强度和硬度,对于许多需要高强度、高耐磨条件下工作的零件则必须淬火与回火处理。

(1) 淬火加热温度

淬火加热温度的选择应以得到细小的奥氏体晶粒为原则,以便淬火后获得细小的马氏体组织。淬火温度主要根据钢的临界点确定:

①亚共析钢: A_{c3} 以上 $30 \sim 50^{\circ}\text{C}$;

②共析钢、过共析钢: A_{c1} 以上 $30 \sim 50^{\circ}\text{C}$;

对于低合金结构钢和高合金工具钢,考虑到合金元素的作用,为了加速奥氏体化,其淬火加热温度可偏高一些。

(2) 淬火介质

钢从奥氏体状态冷却至 M_s 点以下温度所用的冷却介质称为淬火介质。理想淬火介质的冷却特性应该是: 650°C 以上应当缓慢冷却,以尽量降低淬火热应力; $650 \sim 400^{\circ}\text{C}$ 之间应当快速冷却,以避免发生珠光体转变或贝氏体转变; 400°C 以下 M_s 点附近的温度区域,应当缓慢冷却以尽量减小马氏体转变时产生的组织应力。

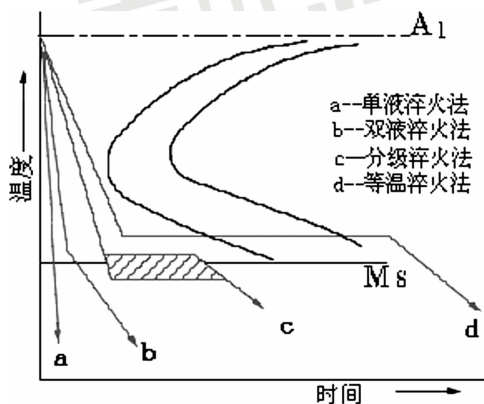
常用的冷却介质有水、盐水或碱水溶液及各种矿物油等。

水的冷却特性不理想,在需要快冷的 $650 \sim 400^{\circ}\text{C}$ 区间,其冷却能力较小。而在需要慢冷的 $400^{\circ}\text{C} - M_s$ 点温度区,其冷却能力又较大。此外,水温对水的冷却能力影响较大。水主要用于尺寸不大、形状简单的碳钢工件淬火。

盐水或碱水溶液可使高温区的冷却能力显著增强,但在 $200 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 低温区的冷却能力也很快。

矿物油的优点是低温区的冷却能力比水小很多,缺点是高温区的冷却能力也较低。

(3) 淬火方法



各种淬火方法的示意图

为了保证获得所需淬火组织,又要防止变形和开裂,必须采用已有的淬火介质再配以各种冷却方法才能解决。包括单液淬火、双液淬火、分级淬火和等温淬火等。

a. 单液淬火法

它是将奥氏体化的工件淬入某一种介质中,连续冷却至介质温度的淬火方法。适用于形状简单的碳钢和合金钢工件。尺寸大的工件用水,尺寸小的工件用油。

b. 双液淬火法

它是将奥氏体化的工件先淬入较强的冷却介质中,冷却至接近 M_s 点温度时,再立即转入冷却能力较弱的淬火介质中冷却,直至完成马氏体相变。适用于尺寸较大的碳钢工件。一般用水作为快冷介质,用油作为慢冷介质。

c. 分级淬火法

它是将奥氏体化的工件首先淬入温度略高于钢的 M_s 点的盐浴或碱浴中保温,当工件内外温度均匀后,再从浴炉中取出空冷至室温,完成马氏体相变。只适用于尺寸较小的工件,否则难以淬透。

d. 等温淬火法

它是将奥氏体化的工件淬入 M_s 点以上温度盐浴中,等温保持足够时间,使之转变为下贝氏体组织,然后取出空冷至室温的淬火方法。适用于形状复杂、尺寸要求精密和重要的小型零件。

2. 钢的淬透性与淬硬性

(1) 淬透性

钢的淬透性是指奥氏体化后的钢在淬火后获得马氏体的能力,其大小以钢在规定条件下淬火获得的淬透层深度和硬度分布来表示。

生产中也常用临界淬火直径表示钢的淬透性。所谓临界淬火直径,用 D_0 表示。在相同冷却条件下, D_0 越大,钢的淬透性越好。

(2) 淬透性的应用

1) 淬透性大的工件易淬透,组织和性能均匀一致;

2) 淬硬性大的工件在淬火时,可选用冷却能力较小的淬火介质以减小淬火应力。

3) 对受力大而复杂的工件,为确保组织性能均匀一致,可选用淬透性大的钢。

4) 当要求工件表面硬度高,而心部韧性好时,可选用低淬透性钢。

(3) 淬硬性

钢的淬硬性是指淬火后马氏体所能达到的最高硬度,

淬硬性主要决定于马氏体的碳含量。

3. 钢的回火

(1) 定义: 回火是把淬火后的钢件,重新加热到 A_1 以下某一温度,经保温后空冷至室温的热处理工艺。

保温时间要求: 工件温度均匀,同时保证组织转变充分

冷却方式: 一般为空冷。为了避免回火脆性,应水冷或油冷。

(2) 目的: 淬火钢件经回火可以减少或消除淬火应力,稳定组织,提高钢的塑性和韧性,从而使钢的强度、硬度和塑性、韧性得到适当配合,以满足不同工件的性能要求。

(3) 回火的种类

1) 低温回火 ($150 \sim 250^\circ\text{C}$)

组织: 回火马氏体组织(由过饱和的 α 相和与其有共格关系的 ε -碳化物所组成的双相组织)

性能: 既保持高硬度、高强度和高耐磨性,又降低内应力和脆性。

适用的钢种: 高碳钢和高碳合金

应用: 一般用来处理要求高硬度和高耐磨性的工件,如用钢制作的刀具、量具、滚动轴承及渗碳件、表面淬火件等。($\text{HRC} \geq 60$)

2) 中温回火 ($350 \sim 500^\circ\text{C}$)

组织: 回火托氏体组织(由针状 α 相和与其无共格关系的细小粒状渗碳体所组成的机械混合物)

性能: 具有高的弹性极限,并保持较高的强度和硬度,淬火内应力基本消除,具有良好的塑性和韧性。

适用钢种: 中碳钢或中碳合金钢

应用: 主要用于各种弹簧,热锻模具,压铸模具等, $35 \leq \text{HRC} \leq 45$)

3) 高温回火 ($500 \sim 650^\circ\text{C}$)

习惯上把淬火加高温回火的热处理称为“调质处理”

组织: 回火索氏体组织(由等轴状 α 相和粒状渗碳体组成的机械混合物)

性能: 具备良好的综合机械性能(较高的强度、塑性、韧性)。

适用钢种: 中碳结构钢或低合金钢

应用: 适用于重要机器零件,如发动机曲轴、连杆、连杆螺栓、汽车拖拉机半轴、机床主轴及齿轮等。这些零件在使用中要求较高的强度并能承受冲击和交变载荷的作用。($28 \leq \text{HRC} \leq 33$)

本节名校真题

一、名词解释:

淬火(2011 河北工业大学),调质处理(2011 青岛科技大学),马氏体(2011 河北工业大学),淬透

性(2012 南京航空航天大学)

二、填空题:

1. 粒状珠光体的组织形态是_____分布在_____上,获得粒状珠光体的三种方法_____,_____,_____. (2012 江苏大学)
2. 理想淬火介质的冷却速度应该是:650 - 400 之间应该是_____冷却,以_____. 冷却至 400 - Ms 点之间应该_____,以_____. (2012 江苏大学)
3. 钢的淬透性是指_____主要取决于_____;钢的淬硬性是指_____主要取决于_____. (2007 青岛科技大学)

三、选择题:

1. 对于亚共析钢,适当的淬火温度一般是_____,淬火后的组织为均匀的马氏体. (2011 华南理工大学)
A. $A_{c1} + 30 \sim 50^{\circ}\text{C}$ B. $A_{cm} + 30 \sim 50^{\circ}\text{C}$ C. $A_{c3} + 30 \sim 50^{\circ}\text{C}$
2. 作为冷却介质,油的冷却能力比水_____. (2012 华南理工大学)
A. 高 B. 相等 C. 低
3. 淬火 + 高温回火被称为_____. (2013 哈尔滨工业大学)
A. 变质处理 B. 调质处理 C. 时效处理
4. 钢的回火工艺在_____后进行. (2013 哈尔滨工业大学)
A. 正火 B. 淬火 C. 退火

四、判断题: (2013 哈尔滨工业大学)

1. 马氏体与回火马氏体的一个重要区别在于:马氏体是含碳的过饱和固溶体.
2. 回火几乎所有的钢都会产生第一类回火脆性,若回火后采用快冷的方式可以避免此类.
3. 回火索氏体与索氏体相比有更好的综合力学性能.

五、简答题

1. 简述钢的淬透性与淬硬性的区别. (2011 华南理工大学)
2. 何为调质处理? 为什么钢经过调质处理后具有良好的综合力学性能?. (2012 华南理工大学)
3. 简述马氏体具有高强度的原因. (2013 哈尔滨工业大学)

六、综合题

1. 甲乙两厂都生产同一种轴类零件,均选用 45 钢(含有 0.45% C, $A_{c3} = 810^{\circ}\text{C}$),硬度要求 220 - 240HB,甲厂采用正火,乙厂采用调质处理,均能达到硬度要求,试制定正火和调质处理的工艺参数(包括加热温度和冷却方式),并分析甲、乙两厂产品的组织和性能差别. (2013 年哈尔滨工业大学)
2. 用 40Cr 钢制造模数为 3 的齿轮,其加工工艺路线为:下料(棒料)→锻造毛坯→热处理 1→粗加工齿形→热处理 2→精加工齿形→热处理 3→磨削.请说明各热处理工艺的名称、目的、加热温

第三节 钢的表面热处理

本节常见题型有名词解释、选择、填空题和简答题。

※本章复习要点

掌握表面热处理(表面淬火、化学热处理)强化表面的原理以及感应加热表面淬火和渗碳处理的目的、适用钢种、工艺路线和最终组织。

※本节重要考点

1. 重点掌握:表面淬火的原理、适用钢种、热处理和最终组织。
2. 掌握:化学处理热的原理、方法、适用钢种和最终组织。
3. 理解:化学热处理的基本过程

※本节重要概念

化学热处理,表面淬火。

※考点精讲

1. 表面淬火

钢的表面淬火是将工件表面快速加热到淬火温度,然后迅速冷却,仅使表面层获得淬火组织,而心部仍保持淬火前组织的热处理方法。

(1)火焰表面淬火——利用氧-乙炔火焰等高温热源将工件表面快速加热到相变温度以上,然后立即进行低温回火,或利用工件内部余热自身回火。这种方法可获得 2~6mm 的淬透深度,设备简单,成本低,适于单件或小批量生产。

(2)感应加热表面淬火

它是利用电磁感应原理,在工件表面产生密度很高的感应电流,并使之迅速加热至奥氏体状态,(心部几乎不受热)随后快速冷却获得马氏体组织的淬火方法。

感应电流频率越高,电流透入深度越小,工件加热层越薄

感应加热表面淬火的特点:

- ① 淬火温度高于一般淬火温度。
- ② 淬火后马氏体晶粒细化,表层硬度比普通淬火高 2~3HRC。
- ③ 表层存在很大的残余压应力。
- ④ 不易产生变形和氧化脱碳。
- ⑤ 易于实现机械化与自动化。感应加热淬火后,为了减小淬火应力和降低脆性,需进行 170~200℃低温回火。

感应加热表面淬火的应用:

① 感应加热淬火通常采用中碳钢(40、45、50)或中合金结构钢(40Cr、40MnB),用以制造机床、汽车及拖拉机齿轮、轴等零件,这些零件在表面淬火之前一般采用正火或调质处理。感应加热淬火解决整体淬火时工件心部韧性差的问题。

② 感应加热淬火也可采用碳素工具钢和低合金工具钢,用以制造量具、模具、锉刀等。

③ 感应加热淬火还可采用铸铁,用以制造机床导轨、曲轴、凸轮轴及齿轮等,显著提高其耐磨性及抗疲劳性能。

2. 钢的化学热处理

(1) 定义

钢的化学热处理是指将工件放在一定温度的活性介质中保温,使活性介质分解出的一种或几种元素的活性原子被钢件表面吸附并向表层扩散,从而改变工件表层的化学成分、组织结构和性能的一种热处理工艺方法。根据渗入元素的不同,可分为渗碳、渗氮、碳氮共渗、多元共渗、渗硼、渗金属等。

(2) 基本过程

① 钢件加热时,化学介质分解出渗入元素的活性原子;

② 活性原子被钢件表面吸附和溶解;

③ 原子由表面向内部扩散,形成一定的扩散层。

(3) 钢的渗碳

将钢放入渗碳的介质中加热并保温,使活性碳原子渗入钢的表层的工艺称为渗碳。其目的是:通过渗碳及随后的淬火和低温回火,使表面获得高碳回火马氏体,具有高硬度、耐磨性和抗疲劳性能;而心部为低碳回火马氏体或索氏体,具有一定的强度和良好的韧性配合。

1) 渗碳方法

渗碳方法有气体渗碳、固体渗碳和液体渗碳。目前广泛应用的是气体渗碳法。

2) 渗碳后的组织

常用于渗碳的钢为低碳钢和低碳合金钢,如 15、20、20Cr、18Cr2Ni4W、20CrMnTi、12CrNi3 等。

渗碳后缓冷组织自表面至心部依次为:过共析组织(珠光体+碳化物)、共析组织(珠光体)、亚共析组织(珠光体+铁素体)的过渡区,直至心部的原始组织。

3) 渗碳后的热处理

热处理:淬火+低温回火。

热处理后的表层组织为:回火马氏体+少量残余奥氏体

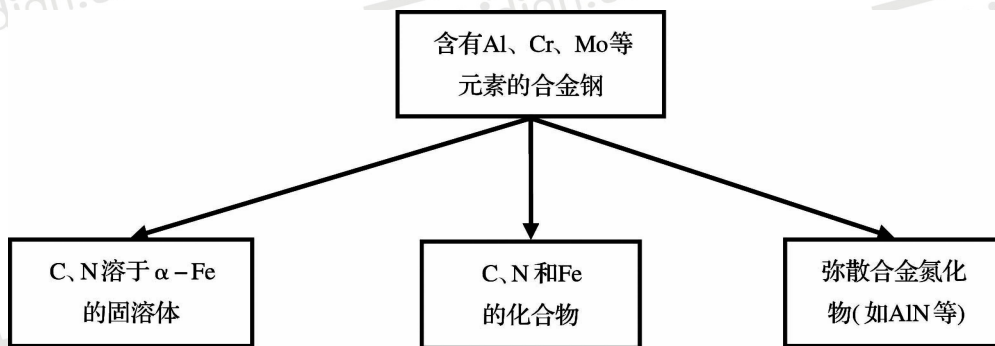
(4) 钢的渗氮

渗氮俗称氮化,是指在一定温度下使活性氮原子渗入工件表面,在钢件表面获得一定深度的富氮硬化层的热处理工艺。其目的是提高零件表面硬度、耐磨性、疲劳强度、热硬性和耐蚀性等。

1) 渗氮方法

常用的渗氮方法有气体渗氮、离子渗氮、氮碳共渗(软氮化)等。生产中应用较多的是气体渗氮。

2) 渗氮后的组织



3) 渗氮后的性能

- ① 氮化层 HRC 为 69 ~ 73, 在 600 ~ 650℃ 有较高红硬性;
(红硬性是指材料在经过一定温度下保持一定时间后所能保持其硬度的能力)
- ② 无需进一步热处理, 渗氮层各性能均优于渗碳层; 一般, 渗氮温度低于渗碳温度, 工件不易变形;
- ③ 氮化层比碳化层薄且脆; 且 $t_{\text{渗氮}} > t_{\text{渗碳}}$, 生产效率低
- ④ 为提高工件心部强韧性, 需在渗氮前进行调质处理

本节名校真题

一、填空题:

1. 化学热处理通常有由____、____和____三个基本过程组成, 而____是控制渗层浓度和厚度的主要过程
2. 常用的两种表面热处理方法是____、____。(2011 华南理工大学)

二、选择题:

1. 下列钢中, _____属于渗碳钢。(2011 华南理工大学)
A. CrWMn B. 1Cr18Ni9Ti C. 18Cr2Ni4W
2. 钢感应加热表面淬火的淬硬层深度, 主要取决于_____(2010 华南理工大学)
A. 钢的含碳量
B. 冷却介质的冷却能力
C. 感应电流频率
D. 感应电流电压

三、某汽车齿轮选有 20CrMnTi 材料制作, 其工艺路线为: 下料→锻造→正火→切削加工→渗碳→淬火 + 低温回火→喷丸→磨削加工。请分别说明上述四项热处理工艺的目的及工艺。(2011 河北工业大学)

四、塑料注塑机中的注塑螺杆一般用 38CrMoAl 钢制造, 既要有一定高的强度, 又要有较高的表面硬度(>900HV)和耐磨性。该螺杆的制造过程大致可分为以下几个步骤:

毛坯→锻造→热处理(1)→粗加工→热处理(2)→精加工→表面渗氮(3)→成品。请列出各热处理工艺的名称、目的, 并给出三种热处理的工艺曲线。(2011 青岛科技大学)

第十一章 金属材料

第一节 工业用钢

本节常见题型有名词解释、选择题、填空题、简答题和综合分析题。

※本章复习要点

掌握钢的分类和编号方法,熟悉,掌握机器零件用钢、工具钢和不锈钢的成分特点、常用钢种及热处理工艺方法。

※本节重要考点

1. 重点掌握:掌握机器零件用钢、工具钢和不锈钢的成分特点、常用钢种及热处理工艺方法。
2. 掌握:掌握钢的分类和编号方法
3. 理解:合金元素在钢中的作用

※本节重要概念

二次硬化,二次淬火,稳定化处理。

※考点精讲

1. 钢的分类和编号

(1) 钢的分类

1) 按用途分类:

结构钢:用于制造各种工程结构和各种机器零件的钢种. 前者又称为工程用钢或结构用钢,后者包括渗碳钢、调质钢、弹簧钢、滚动轴承钢。

工具钢:用于制造各种加工工具的钢种. 根据工具的不同用途. 又可分为刃具钢、模具钢、量具钢。

特殊性能钢:包括不锈钢、耐热钢、耐磨钢、电工钢等

2) 按化学成分分类:

碳素钢:又分为低碳钢($w_c \leq 0.25\%$)、中碳钢($w_c = 0.25 - 0.6\%$)和高碳钢($w_c > 0.6\%$)。

合金钢:又分为低合金钢($w_c \leq 5\%$)、中合金钢($w_c = 5 - 10\%$)和高合金钢($w_c > 10\%$)。

另外,根据钢中所含主要合金元素的不同,也可分为锰钢、铬钢、铬镍钢、硼钢等。

3) 按显微组织分类:

退火状态类:亚共析钢,共析钢,过共析钢,莱氏体钢

正火状态类:珠光体钢,贝氏体钢,马氏体钢和奥氏体钢

室温组织类:铁素体钢,奥氏体钢,双相钢

4) 按品质分类:

普通质量钢:

优质钢: $w_s, w_p \leq 0.035\%$

高级优质钢: $w_s, w_p \leq 0.030\%$

(2) 钢的编号

1) 普通碳素结构钢

Q + 屈服点数值(单位为 MPa) + 质量等级 + 脱氧方法

2) 优质碳素结构钢

牌号用两位数字表示,其含义为含碳量的万分之几

3) 碳素工具钢

“T”开头,其后跟以表示含碳量的千分之几的数字

4) 合金结构钢

两位数字(碳量) + 合金元素符号 + 数字(合金元素量). 碳含量为万分之几;合金元素含量为百分之几。如 30CrMnSi

5) 合金工具钢

数字(碳含量) + 合金元素符号 + 数字(合金元素含量). 若含碳量 $\geq 1.0\%$, 则不标出;若含碳量 $< 1.0\%$, 则以千分之几标出. 如 CrMn, 9Mn2V

6) 滚动轴承钢

由“GCr + 数字”组成. 数字表示碳含量的千分之几. 如 GCr15

7) 不锈钢与耐热钢(珠光体耐热钢除外)

“数字(碳含量) + 合金元素符号 + 数字(合金元素含量)”. 碳含量为万分之几, 如 95Cr18. 但当含碳量小于 0.08% 时, 以“06”表示; 当含碳量小于 0.03% 时, 以“02”表示; 当含碳量小于 0.01% 时, 以“008”表示.

2. 合金元素在钢中的作用

(1) 合金元素在钢中的分布

- 1) 溶入铁素体、奥氏体、马氏体或渗碳体的晶格中, 形成合金固溶体或合金渗碳体。
- 2) 与碳或合金元素结合, 形成碳化物或金属间化合物。
- 3) 与非金属(O、N、S)结合, 形成非金属夹杂物。
- 4) 有些元素如 Pb 既不溶解于铁, 也不形成化合物, 以游离态存在。高碳钢中的碳有时也以自由态(石墨)存在

(2) 合金元素对铁碳相图的影响

- 1) 有的合金元素扩大(缩小)铁素体相区, 有的合金元素扩大奥氏体(缩小)相区。

- 2) 影响相图中 A_1 、 A_3 、 A_{cm} 、S、E 点位置

- (3) 合金元素对钢的热处理有影响

- 1) 影响钢的奥氏体化(稳定奥氏体,防止晶粒粗化)
- 2) 影响过冷奥氏体的转变(珠光体,贝氏体,马氏体)
- 3) 影响残余奥氏体和马氏体的转变(二次硬化,第二类回火脆性)

3. 机器零件用钢

(1) 机器零件用钢的合金化特点

- 1) 提高钢的淬透性(除 Al、Co 外,均提高奥氏体稳定性)
- 2) 获得能满足使用要求的回火组织和性能(Mo、W)。
- 3) 提高钢的切削加工性能(S、Pb、Ca、Te、Se)。

(2) 渗碳钢——经渗碳处理后使用的钢

1) 化学成分: $w_c = 0.10\% - 0.25\%$, 加入提高淬透性元素(Mn、Cr、Ni、B、Si)、含锰渗碳钢中加入阻止奥氏体晶粒长大元素(Ti、V)

2) 常用的渗碳钢: 15, 20, 20Mn2, 20CrMnTi, 20Cr2Ni4A

3) 性能要求与应用: 心部要求强韧、表面高硬耐磨抗疲劳的零件, 如拖拉机的变速齿轮、内燃机凸轮、活塞销等

4) 工艺路线: 下料→锻造毛坯→粗切削加工→表面渗碳热处理→热处理→精切削加工

热处理: 直接淬火 + 低温回火。

5) 热处理后组织

表层组织: 回火马氏体 + 粒状碳化物;

心部组织: 低碳马氏体(淬透)或含铁素体(未淬透)

(3) 调质钢——调质处理后使用的结构钢

1) 化学成分: $w_c = 0.25\% - 0.45\%$, 加入提高淬透性元素(Mn、Cr、Ni、B、Si)、防止第二类回火脆性元素(Mo、W)、细化奥氏体晶粒的元素(W、Mo、V、Al)等

2) 常用的调质钢: 45, 40Cr, 30CrMnSi, 40CrNiMo

3) 性能要求与应用: 要求良好的综合性能, 如机床主轴、曲轴、连杆、高强度螺栓等

4) 工艺路线: 下料→锻造毛坯→预备热处理→粗切削加工→最终热处理→精切削加工

预备热处理: 正火或退火, 目的是消除组织缺陷(如带状组织); 细化晶粒; 降低硬度, 便于切削加工。

最终热处理: 淬火 + 高温回火(600 - 650℃)。

5) 调质处理后组织为回火索氏体。其组织特点以下:

① 在铁素体基体上均匀分布的粒状碳化物起弥散强化作用, 溶入铁素体的合金元素其固溶强化作用, 从而保证钢具有较高的屈服强度和疲劳强度。

② 作为基体组织的铁素体是从淬火马氏体转变而成的, 晶粒细小, 使钢的冷脆倾向大大减小。

③ 组织均匀性好, 减少了裂纹在局部薄弱地区形成的可能性, 可以保证有良好的塑性和韧性。

(4) 弹簧钢

1) 化学成分: $w_c = 0.50\% - 0.90\%$, 加入提高淬透性元素、强碳化物形成元素、细化奥氏体晶粒的元素等

2) 常用的弹簧钢: 65, 70, 85, 65Mn, 60Si2Mn, 50CrV

3) 性能要求: 高的弹性极限或屈服比, 高的疲劳强度, 耐冲击载荷, 具有一定的塑性和韧性。

4) 热成形弹簧工艺路线: 热轧钢丝或扁钢剪断→热卷成形→热处理→喷丸

热处理为淬火 + 中温回火 ($400 - 450^\circ\text{C}$)

5) 弹簧热处理后的组织: 回火托氏体。

回火托氏体具有以下特点:

淬火后的马氏体已充分分解, 分解出的渗碳体以细小颗粒分布在 α 相基体上; α 相的回复过程也充分进行, 开始多边化, 但亚结构尚未长大; 残余奥氏体已充分分解, 内应力已大部分下降。弹性极限达到极大值。

5) 滚动轴承钢

1) 化学成分: $w_c = 0.95\% - 1.10\%$, 加入 Cr、Si、Mn、Mo 等元素, 其目的是提高淬透性, 形成合金渗碳体, 使钢种的碳化物细小均匀, 提高耐蚀性

2) 常用的轴承钢: GCr15, GCr15SiMn, GCr15SiMo

3) 性能要求: 很高的强度硬度、接触疲劳强度和耐磨性

4) 工艺路线: 下料→轧、锻造毛坯→预备热处理→粗切削加工→最终热处理→精切削加工

预备热处理: 球化退火。目的: 降低硬度, 以利于切削加工; 获得均匀分布的粒状珠光体, 为最终热处理作好组织准备。

最终热处理: 淬火 + 低温回火 ($150 - 160^\circ\text{C}$)

5) 热处理组织: 回火马氏体 + 细小均匀分布的碳化物 + 少量的残余奥氏体。

4. 工具钢

(1) 碳素刀具钢

1) 化学成分: $w_c = 0.65\% - 1.35\%$

2) 常用的碳素刀具钢: T8A, T10, T12

3) 最终热处理, 淬火 + 低温回火 ($180 - 200^\circ\text{C}$)

(2) 低合金刀具钢

1) 化学成分: $w_c = 0.75\% - 1.45\%$

2) 常用的低合金刀具钢: CrMn, 9SiCr, CrWMn

3) 最终热处理, 淬火 + 低温回火 ($250 - 300^\circ\text{C}$)

(3) 高速钢

1) 化学成分: $w_c = 0.7\% - 1.6\%$, 加入 W、Mo、Cr、Co、V 等元素, 目的是提高淬透性、防止奥氏体晶粒粗大并产生二次硬化效应、抗氧化耐腐蚀、热硬性。

2) 常用的高速钢: W18Cr4V, W6Mo5Cr4V2

3) 性能要求: 很高的热硬性、耐磨性和足够的强度, 并兼有适当的塑性和韧性

4) 工艺路线: 铸件(莱氏体钢) → 锻造 → 预备热处理 → 粗切削加工 → 最终热处理 → 精切削加工

预备热处理: 等温退火, 其目的是获得索氏体和细小粒状碳化物, 消除内应力, 降低硬度, 有利于切削加工。

最终热处理: 淬火 + 三次 560℃ 回火. 其目的: 500 – 600℃ 产生二次硬化效应, 提高热硬性, 降低残余奥氏体量

二次硬化: 淬火高速钢在 500 – 600℃ 回火时, 由于细小弥散的 W₂C 和 VC 型碳化物从马氏体析出而使钢的硬度和强度明显升高的现象。与二次淬火有关。

二次淬火: 淬火高速钢在 500 – 600℃ 回火时, 残余奥氏体中的碳和合金元素由于碳化物的析出而降低, 使其 Ms 升高而转变为马氏体。

(4) 冷作模具钢

1) 化学成分: $w_c = 0.55\% - 0.70\%$, 耐磨高硬度工件的 $w_c = 0.85\% - 2.30\%$, 加入提高淬透性元素(Cr、Mn)、强碳化物形成元素(Mo、W、V)细化晶粒并产生二次硬化效应, 加入抗冲击疲劳的元素Si。合金元素总量 10 ~ 13%。

2) 常用的冷作模具钢: T8A, T10A, Cr12, Cr12MoV

3) 性能要求: 高的强度、硬度、耐磨性和足够的韧性

4) Cr12MoV 工艺路线: 铸件(莱氏体钢) → 锻造 → 预备热处理 → 粗切削加工 → 最终热处理 → 精切削加工

预备热处理: 等温退火, 其目的是获得粒状珠光体组织, 消除内应力, 降低硬度, 有利于切削加工。

最终热处理: 淬火 + 低温回火(150 – 275℃)。

(5) 热作模具钢(热态金属或液态金属成形的模具用钢)

1) 化学成分: $w_c = 0.3\% - 0.6\%$, 加入提高淬透性元素(Cr、Ni、Si、Mn)、强碳化物形成元素(Mo、W)细化晶粒并产生二次硬化效应, 加入抗冲击疲劳的元素Si。属于中碳中合金钢。

2) 常用的高速钢: 5CrMnMo, 3Cr2W8V, 4CrMoSiV

3) 性能要求: 良好的耐磨性和一定的韧性

4) 5CrMnMo 工艺路线: 锻造 → 预备热处理 → 粗切削加工 → 最终热处理 → 精切削加工

预备热处理: 等温退火, 其目的是使碳化物球化, 消除内应力, 降低硬度, 有利于切削加工。

最终热处理: 淬火后, 立即高温回火

最终热处理组织: 回火索氏体(520 ~ 540℃)

(回火索氏体 + 回火托氏体)(490 ~ 510℃)

回火托氏体(490 ~ 510℃)

5. 不锈钢

(1) 不锈钢提高耐蚀性的途径

1) 加入 Cr、Ni、Si 等元素, 提高基体的电极电位, 减少微电池数目;
2) 降低碳含量, 减少碳化物尤其是碳化铬的析出, 一方面避免基体中 Cr 含量的减少, 另一方面抑制晶间腐蚀。

3) 加入 Cr、Al、Si 等, 在钢件表面形成致密的钝化膜等提高基体金属的电极电位。

4) 加入 Cr、Ni, 使钢在室温下获得单相固溶体组织, 也减少微电池数目。

(2) 马氏体不锈钢 (Cr13 型不锈钢)

1) 成分特点: $w_C = 0.1 - 1.0\%$, $w_{Cr} = 13 - 18\%$, 以提高耐蚀性和淬透性。

2) 典型牌号: 12Cr13、20Cr13、30Cr13、40Cr13。

3) 热处理: 淬火 + 回火。淬火前得到单相奥氏体组织, 淬火得到马氏体。碳含量较低的不锈钢经高温回火后得到回火索氏体组织, 主要用于要求塑、韧较好的耐蚀零件。40Cr13 经低温回火后得到回火马氏体组织, 主要用于制造医疗器具、量具。

(3) 铁素体不锈钢 (Cr17 型不锈钢)

1) 成分特点: $w_{Cr} > 15\%$, $w_C \leq 0.15\%$ (较低)

2) 典型牌号: 10Cr17、10Cr17Mo、008Cr30Mo2。

3) 热处理: 退火状态使用。该类钢在氧化性酸中具有良好的耐蚀性, 同时具有较高的抗氧化性能。主要缺点: 韧性低, 脆性大。引起脆性的原因:

① 晶粒粗大;

② 475℃ 脆性;

③ σ 相脆性。

(4) 奥氏体不锈钢 (18-8 型不锈钢)

1) 成分特点: $w_{Cr} = 18\%$, $w_{Ni} = 9\%$, $w_C \leq 0.25\%$

2) 典型牌号: 06Cr19Ni10、06Cr18Ni9Ti、12Cr18Ni9

3) 性能: 该类钢有很好的耐蚀性, 同时具有优良的抗氧化性和力学性能。主要缺点: 在 400 - 850℃ 保温或缓慢冷却时会发生严重的晶界腐蚀破坏。

4) 热处理: 固溶处理 + 稳定化处理 + 去应力处理

固溶处理: 将 $w_C \leq 0.25\%$ 的 18-8 型钢加热至 1000 - 1150℃, 使碳化物全部溶解到奥氏体中, 然后快速冷却获得单相奥氏体组织的热处理工艺。

稳定化处理: 将含 Ti、Nb 的奥氏体不锈钢经固溶处理后, 再经 850 - 900℃ 保温 1 - 4h 后空冷的一种处理方法。其目的是使之析出 TiC、NbC, 抑制 Cr₂₃C₆ 的析出, 以防止晶间腐蚀。

去应力处理: 消除钢再冷加工或焊接后的残余应力的热处理工艺。一般加热至 300 - 350℃ 回火。

本节名校真题

一、选择题:

1. 以下 3 种铝合金中耐蚀性最好的是_____。(2011 华南理工大学)

A. LF6

B. LY12

C. LC4

2. 工业纯铝制造导线时,经过冷拔处理后其强度_____。(2011 华南理工大学)

A. 升高

B. 降低

C. 不变

3. 下列金属中,导电性最好的是_____。(2011 华南理工大学)

A. Cu

B. Mg

C. Ti

4. 对于可热处理强化的铝合金,其热处理方法是_____ (2011 华南理工大学)

A. 淬火 + 低温回火

B. 完全退火

C. 固溶 + 时效

5. 1Cr17 是_____钢。(2012 华南理工大学)

A. 铁素体

B. 马氏体

C. 奥氏体

6. 下列钢中,_____属于渗碳钢。(2011 华南理工大学)

1. CrWMn

B. 1Cr18Ni9Ti

C. 18Cr2Ni4W

二、名词解释:

1. 二次硬化

2. 红硬性(2012 南京航空航天大学)

三、填空题

1. 按化学成分分类,钢可分为_____和_____两大类。(2011 年河北工业大学)

2. 牌号为 W18Cr4V 的钢是_____。(2012 华南理工大学)

四、简答题

Cr18Ni9 工业常用的奥氏体不锈钢,请写出该钢的主要合金元素的含量及这些元素的主要作用。

(2012 华南理工大学)

五、综合分析题:

用 40Cr 钢制造模数为 3 的齿轮,其加工工艺路线为:

下料(棒料)→锻造毛坯→热处理 1→粗加工齿形→热处理 1→精加工齿形→热处理 3→磨削。请说明各热处理工艺的名称、目的、加热温度及冷却方式。(2011 华南理工大学)

第二节 铸 铁

本节常见题型选择题、判断题、填空题和简答题。

※本章复习要点

熟悉铸铁的分类和性能特点,熟悉石墨的形成过程,掌握石墨与基体对铸铁性能的影响以及灰口铸铁、可锻铸铁和球墨铸铁的命名、组织特点和热处理方法。

※本节重要考点

1. 重点掌握:石墨与基体对铸铁性能的影响以及灰口铸铁、可锻铸铁和球墨铸铁的命名、组织特

点和热处理方法。

2. 掌握:铸铁的分类和性能特点,熟悉石墨的形成过程

3. 理解:白口铸铁、麻口铸铁、灰口铸铁的区别

※ 考点精讲

1. 铸铁的分类和性能

(1) 按碳的存在形式分类:

白口铸铁、灰口铸铁、麻口铸铁

(2) 按石墨的形态分类:

灰口铸铁、可锻铸铁、球墨铸铁、和蠕墨铸铁。其基体组织(F, P 或 F + P), 石墨分别呈片、球、团絮、蠕虫状

(3) 性能:白口铸铁硬而脆;灰口铸铁(与钢相比),熔炼简便、成本低廉,虽然强度、塑性和韧性较低,但是铸造性能好,减摩和耐磨性好,良好的消振性和切削加工性及缺口敏感性。

2. 石墨的形成与控制

(1) 当铁液中 C、Si 的含量较高,并且冷且速度非常缓慢时,可直接从铁液中析出石墨。

(2) 已经形成渗碳体的铸铁在高温下长时间退火,可使渗碳体分解析出石墨。

(3) 如果在浇铸前向铁液中加入硅铁或钙铁等孕育剂,进行孕育处理,促进石墨的非均匀形核,可使灰铸铁粗片石墨细化,形成孕育铸铁

3. 石墨与基体对铸铁性能的影响

(1) 含碳量越多,石墨越粗大,其力学性能越低。

(2) 石墨分布越均匀,力学性能越好。

(3) 石墨数量越少,力学性能越好。

(4) 石墨从片状向蠕虫、团絮状、球状的转变的过程,力学性能逐渐提高。

(5) 对同一类铸铁,铸铁基体组织中珠光体相越多,其塑性越好;基体中珠光体数量越多,其抗拉强度和硬度越高。

4. 常用铸铁的编号、组织及热处理

(1) 灰铸铁

1) 牌号:HT + 数字. HT 表示灰口铸铁,符号后面的数字表示最低抗拉强度. 如 HT200, HT350.

2) 组织:根据石墨化进行的程度,可以得到 F, F - P 和 P 三种不同的基体组织,石墨为片状石墨。

3) 热处理:消除内应力退火,消除白口组织的退火或正火,表面淬火。

(2) 可锻铸铁

1) 牌号:KT + H 或 Z + 数字 - 数字. KT 表示可锻铸铁,后面 H 表示黑心可锻铸铁;Z 表示珠光体可锻铸铁;B 表示白心可锻铸铁. 符号后面的数字数字分别表示最低抗拉强度和最低延伸率. 如

2) 组织:黑心可锻铸铁得到 F 基体 + 团絮状石墨组织;珠光体可锻铸铁得到 P 基体 + 团絮状石墨组织。

3) 热处理:黑心可锻铸铁和珠光体可锻铸铁是由白口铸铁长时间石墨化退火得到的。

(3) 球墨铸铁

1) 牌号:QT + 数字 - 数字. QT 表示球墨铸铁,符号后面的数字数字分别表示最低抗拉强度和最低延伸率. 如 QT400 - 18, QT500 - 7, QT900 - 2.

2) 组织:球铁组织由基体组织和球状石墨组成。球铁的基体组织常用的有 F、F - P 和 P 三种。经合金化和热处理,也可以得到下 B、M、T、S 和奥氏体等基体组织。

3) 热处理:球铁的性能主要取决于基体组织。主要的热处理有低温退火,高温退火,正火,调质处理,等温淬火

本节名校真题

一、填空题

1. 可锻铸铁是由一定成分的白口铸铁经过_____得到的一种高强度铸铁。(2011 河北工业大学)

2. 影响铸铁石墨化的因素有_____和_____。(2010 年华南理工大学)

二、选择题:

1. 蠕墨铸铁的显微组织由金属基体和_____石墨组成。(2012 年华南理工大学)

A. 片状 B. 球状 C. 蠕虫状

2. 对球磨铸铁进行热处理,是通过改变_____来改善性能的。(2011 年华南理工大学)

A. 石墨形态 B. 石墨数量 C. 基体组织

三、判断题:(2011 华南理工大学)

在铸铁的生产中,为了促进石墨的形成,必须提高铸铁中碳、硅的含量,增大铁液的冷却速度_____

四、简答题

为什么基体相同的铸钢和铸铁所测得的力学性能相差较大?(2010 年河北工业大学)

第三节 有色金属及合金

本节常见题型选择题、判断题、填空题和简答题。

※本章复习要点

熟悉铝合金、铜合金和钛合金的分类和性能特点。掌握铝合金、铜合金和钛合金的种类、典型牌号、组织结构特点和热处理方法。

※本节重要考点

1. 重点掌握:铝合金、铜合金和钛合金的种类、典型牌号、组织结构特点和热处理方法。
2. 掌握:熟悉铝合金、铜合金和钛合金的分类和性能特点。

※本节重要概念

固溶处理,时效处理。

※考点精讲

1. 铝及铝合金

(1) 铝合金的性能特点及分类

1) 性能特点:密度小,比强度高,导电导热性好

2) 按用途和特点分类:根据合金元素和加工工艺条件,可将铝合金分为变形铝合金和铸造铝合金。变形铝合金又可分为热处理强化铝合金(如硬铝、超硬铝、锻铝)和不可热处理强化铝合金(如防锈铝)。变形铝合金按性能特点和用途又可分为防锈铝、硬铝、超硬铝和锻铝。

铸造铝合金:铝——硅系,铝——铜系,铝——镁系,铝——锌系

(2) 铝合金的强化

1) 形变强化。适用于纯铝及不可热处理强化的铝合金,如铝——硅系、铝——锰系、铝——镁系等。

2) 固溶强化。如铝——铜、铝——镁、铝——硅、铝——锌、铝——锰等二元合金一般都能形成有限固溶体,并且均有较大的溶解度,因此具有较大的固溶强化效果。

3) 细晶强化。对于不可热处理强化或强化效果不大的铸造铝合金和变形铝合金,可以通过添加微量合金元素(如 Ti, Zr, Re 等)细化晶粒,提高铝合金的力学性能。

4) 沉淀强化。适用于可热处理强化的铝合金,如铝——铜系、铝——铜——镁系、铝——镁——硅系等铝合金, Cu、Mg、Si 等元素与 Al 能形成 CuAl_2 、 Mg_2Si 、 Al_2CuMg 等金属化合物(强化相)。这些强化相在铝中有较大溶解度,且随温度下降而显著减小。因此,过饱和固溶体由于强化相在脱溶过程中的某些中间状态具有特殊晶体结构,而使铝合金得到强化。铝合金加热到单相区保温后,快速冷却得到过饱和固溶体的热处理工艺称固溶处理。

过饱和固溶体在室温放置或加热到某一温度保温,随着时间延长,其强度和硬度升高,塑性和韧性下降的现象称沉淀强化或时效强化。沉淀强化或时效强化是铝合金强化的主要途径。合金经固溶处理后在室温下放置发生过饱和固溶体脱溶的过程称为自然时效,加热到室温以上某一温度等温保持发生过饱和固溶体脱溶的过程称为人工时效。时效温度过高,时效时间过长,将使合金硬度降低,称为过时效

2. 铜及铜合金

(1) 铜及铜合金的性能特点及分类

1) 晶体结构:纯铜具有 FCC 结构,无同素异构转变。

2) 性能特点: 延展性好, 导电导热性好。

3) 分类和牌号: 纯铜也成紫铜。

铜合金有黄铜(铜——锌系)、青铜两大类。

黄铜按其退火组织可分为 α 黄铜和 $(\alpha + \beta)$ 黄铜。

青铜包括锡青铜、铝青铜和铍青铜。

(2) 黄铜

1) 合金系: 铜锌系。

2) α 黄铜, 又称单相黄铜。塑性好, 可进行冷、热压力加工。铸态组织化学成分不均匀, 有树枝状偏析。经变形和再结晶退火后可得到带有退火孪晶的多边形晶粒。常用的 α 黄铜牌号有 H70, H80, H68。

3) $(\alpha + \beta)$ 黄铜, 又称双相黄铜。高温塑性好, 宜热压力加工。常用的牌号有 H59, H62。

(3) 青铜

1) 锡青铜: 铜——锡系。 α 相是固溶体, FCC 结构, 塑性好; 增强相 β 是以电子化合物 Cu_5Sn 为基的固溶体, BCC 结构高温塑性好; 增强相 γ 是以电子化合物 Cu_3Sn 为基的固溶体, 硬而脆; 增强相 δ 是以电子化合物 $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ 为基的固溶体, 复杂立方结构, 硬而脆; 增强相 ε 是以电子化合物 Cu_3Sn 为基的固溶体。一般情况下, 得到 $\alpha + \delta$ 组织。

具有高的弹性和耐磨性, 耐蚀性好。常用的牌号: QSn4-3, ZCuSn10Pb1, ZCuSn10Zn2

2) 铝青铜: 铜——铝系。 α 相是固溶体, FCC 结构, 塑性好; 增强相 β 是以电子化合物 Cu_3Al 为基的固溶体, 增强相 γ_2 是以电子化合物 $\text{Cu}_{32}\text{Al}_{19}$ 为基的固溶体, 硬而脆。一般情况下, 得到 $\alpha + \gamma_2$ 组织。

铝青铜的强度、硬度、耐磨性和耐蚀性都超过锡青铜和黄铜, 铸造性能好, 但切削性能、焊接性能较差。

常用的牌号: QAl9-2, QAl9-4, QAl10-4

3. 钛及钛合金

(1) 纯钛

1) 晶体结构: 固态下具有同素异构转变, 在 882°C 以下为 α -Ti, 具有密排六方结构, 在 882°C 以上为 β -Ti, 具有体心立方结构。

2) 性能: 密度小, 熔点高, 耐热性好, 耐蚀性好, 低温性好, 热膨胀系数很小, 导热性差, 强度优于钢。但切削性能、耐磨性较差。

(2) 钛合金

1) α 钛合金: 主要元素是 α 稳定元素 Al, 主要起固溶强化作用。组织为单相固溶体, 不能通过热处理强化。通常在退火或热轧下使用。典型牌号: TA5、TA6、TA7

2) β 钛合金: 合金中含有大量 β 稳定元素 Mo, 在水冷或空冷条件下可得到稳定均匀的 β 相。经时效处理, 从 β 中析出弥散的 α 相, 合金强度显著提高, 同时具有高的断裂韧性。 β 相的淬透性好, 是

3) ($\alpha + \beta$) 钛合金: 合金中同时加入稳定 β 和稳定 α 的元素, 使 β 和 α 都得到强化。在水冷或空冷条件下可得到稳定均匀的 β 相。常温强度、耐热强度及加工塑性较好, 并可进行热处理强化, 生产工艺简单, 性能调整范围大, 应用广泛。但其组织不够稳定, 焊接性能不及 α 钛。典型牌号: Ti - Al - Mn 系 (TC1、TC2), Ti - Al - V 系 (TC3、TC4 和 TC10), Ti - Al - Cr 系 (TC6), Ti - Al - Mo 系 (TC9, TC10 和 TC11)。

一、选择题:

1. 以下 3 种铝合金中耐腐蚀性最好的是_____。(2011 华南理工大学)
A. LF6 B. LY12 C. LC4
2. 工业纯铝制造导线时,经过冷拔处理后其强度_____。(2011 华南理工大学)
A. 升高 B. 降低 C. 不变
3. 下列金属中,导电性最好的是_____。(2011 华南理工大学)
A. Cu B. Mg C. Ti
4. 对于可热处理强化的铝合金,其热处理方法是_____ (2011 华南理工大学)
A. 淬火 + 低温回火 B. 完全退火 C. 固溶 + 时效
5. 不能通过时效强化的钛合金是_____ (2012 华南理工大学)
A. α 型 B. $\alpha + \beta$ 型 C. β 型

二、判断题：

1. Cu - Zn 合金一般称为黄铜,而 Cu - Sn 合金一般称为青铜。(2011 华南理工大学)
2. 根据合金元素和加工工艺条件,可将铝合金分为变形铝合金和铸造铝合金。(2011 华南理工大学)

三、填空题:

1. 若加热到某一温度使过饱和固溶体脱溶,合金产生强化的效应称为_____。(2012 华南理工大学)
2. 变形铝合金分为_____和_____。(2010 华南理工大学)
3. 铜合金分为_____、_____和_____。(2010 华南理工大学)

四、论述铝合金的主要强化方式。(2012 华南理工大学)

五、在工业生产中,钢和铝合金的热处理经常采用淬火,分别说明钢和铝合金淬火处理的目以及淬火前后材料的组织和性能的变化。(2011 华南理工大学)