

## 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点。

#### ※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  $\alpha, \beta, \gamma$  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:  $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$  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, 上底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:  $\gamma$ -Fe, Cu, Al, Ni 等; 体心立方晶体的金属:  $\alpha$ -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,  $[100] \perp (100)$ ,  $[111] \perp (111)$ ,  $[110] \perp (110)$ 。

## 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  $120^\circ$ ,  $Z$  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  $120^\circ$ , 轴



上的度量长度为六角底面的棱边长度,即晶格常数  $a$ ,  $Z$  轴垂直于底面,其度量单位为棱边高度,即晶格常数  $c$ 。这样,晶面指数就以  $(hkl)$  表示,分别为晶面在  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  及  $Z$  轴上的截距的倒数化成最小整数。显然:  $i = -(h+k)$

(3) 六方晶系中一些重要的晶面和晶向指数

晶面:  $(0001)$ ,  $(10-10)$ ,  $(11-20)$ ,  $(01-11)$ ,  $(10-12)$

晶向:  $[2-1-10]$ ,  $[11-20]$ ,  $[-12-10]$ ,  $[1-100]$ ,  $[-1011]$ ,  $[-12-13]$

## 12. 立方晶系的重要计算公式

(1) 立方晶系两晶向间的夹角公式

$$\cos\varphi = \frac{h_1h_2 + k_1k_2 + l_1l_2}{\sqrt{(h_1^2 + k_1^2 + l_1^2)(h_2^2 + k_2^2 + l_2^2)}}$$

(2) 立方晶系两平行晶面间的距离公式

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

## 14. 晶体的多晶型性

- 多晶型性: 当外部条件(如温度和压强)改变时,元素的晶体结构由一种晶体结构转变为另一种晶体结构,元素的这种性质称为多晶型。这种转变称之为多晶型转变或同素异构转变。

- 当晶体结构改变时,金属的性能(如体积、强度、塑性、磁性、导电性等)往往要发生突变。多晶型转变是金属能通过热处理改变性能的原因之一。

## 本节名校真题

### 一、名词解释:

1. 空间点阵 (2011 年河北工业大学);
2. 晶胞 (2011 年华南理工大学)

### 二、选择题:

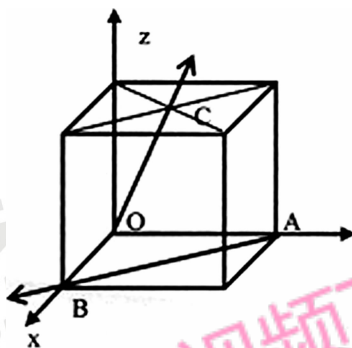
1. 空间点阵是由——在空间做有规律的重复排列。(2011 年河北工业大学)  
A. 原子                      B. 离子                      C. 几何点
2. 在立方晶系中,点阵常数是指——。(2012 年华南理工大学)  
A. 最近邻原子间距              B. 晶胞棱边的长度              C. 最近邻原子中心间距之半
3. 当由  $n$  个球构成立方紧密堆积时,在密堆积结构中四面体中间隙数为——。(2011 年河北工业大学)  
A.  $n$  个                      B.  $2n$  个                      C.  $4n$  个

### 三、填空题:

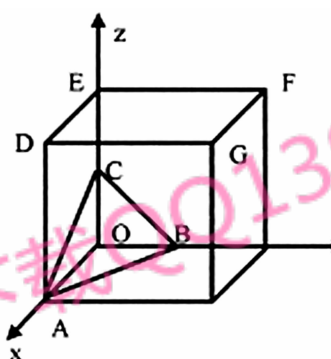
1. 在立方晶系中,  $\{111\}$  晶面族包括——等四组晶面。(2010 年华南理工大学)
2.  $\alpha$ -Fe、 $\gamma$ -Fe 和 Mg 的晶体结构分别为——,——,——。(2012 年华南理工大学)



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) 肖拓基空位: 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关变、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  $\tau$ 。随着位错密度  $\rho$  的增加而减小;当位错密度较高时,晶体的强度  $\tau$ 。随着位错密度  $\rho$  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  $10^\circ$  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  $10^\circ$  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  $1^\circ$  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  $\text{Mg}$  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.

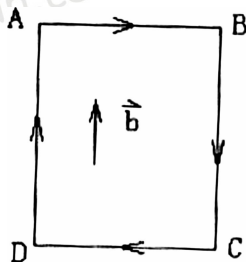
8. 位错引起的晶格畸变大小可用\_\_\_\_\_表示. (2010 年华南理工大学)
9. 位错的滑移面是\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_所构成的晶面. 刃型位错的滑移面有\_\_\_\_\_个, 刃型位错的滑移面有\_\_\_\_\_个. (2010 年华南理工大学)

#### 五、简答题

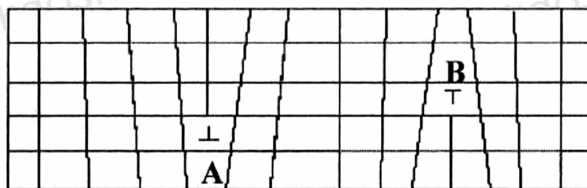
1. 简述金属晶体中缺陷的类型. (2011 年河北工业大学)
2. 如图所示一位错环, 该位错环各部分能否都是螺型位错或各部分都是刃型位错, 为什么? 指出个部分位错的性质. (2010 年青岛科技大学)

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  $\Delta T$  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。

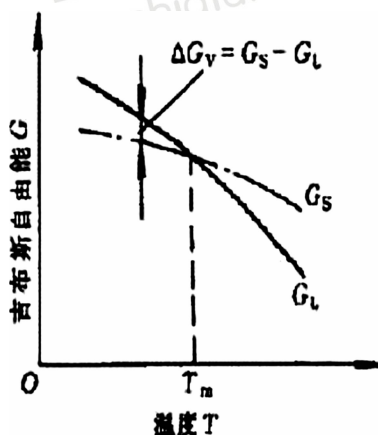
冷却速度越大,实际凝固温度越低,过冷度越大。过冷是凝固的必要条件之一。

##### 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,推导出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  $\Delta T$  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。

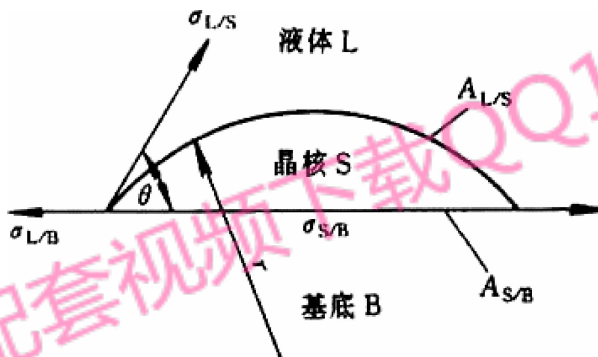
#### (5)形核率与过冷度的关系

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  $\theta$ ,有效地促进非均匀形核;在曲率半径和  $\theta$  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,又称小平面界面。

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 $\Delta r$ 。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  $\text{Fe}_3\text{C}$ 、 $\text{CuZn}$ 、 $\text{CuAl}_3$ 。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  $\text{GaAs}$ 、 $\text{Nb}_3\text{Sn}$ 、 $\text{NiTi}$  和  $\text{CuZn}$ 、 $\text{LaNi}_5$  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: $\text{MgS}$ 、 $\text{MnS}$ 、 $\text{Mg}_2\text{Si}$ 、 $\text{Mg}_2\text{Sn}$ 、 $\text{Mg}_2\text{Pb}$ 、 $\text{AlN}$ 、 $\text{SiC}$  等。 $\text{MnS}$  是钢铁材料中常见的夹杂物, $\text{Mg}_2\text{Si}$  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ⅡB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: $\text{CuZn}$ 、 $\text{CuAl}_3$ 、 $\text{Cu}_3\text{Sn}$ 、 $\text{AgZn}$ 、 $\text{FeAl}$ 、 $\text{NiAl}$  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 also 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:

- 二元合金的相结构可分为两大类,即\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。(2010 年华南理工大学)
- 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:

- 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)
- 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)
- 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)
- 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

- 了解相图的应用。
- 熟悉热分析法建立相图的过程。
- 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  $T$  - 二元组成分  $x$  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。

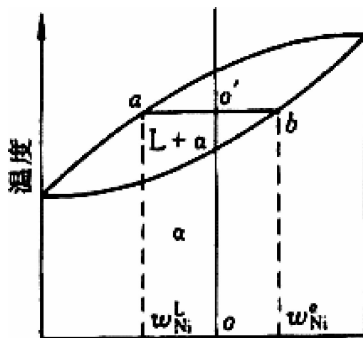
(2) 将上述临界点标在温度成分坐标图上,再将两类临界点连接成线,得到  $\text{Cu} - \text{Ni}$  合金相图。其中上临界点的连线称为液相线,表示合金结晶的开始温度或加热过程中熔化终了温度;下临界点的连线称为固相线,表示合金结晶的终了温度或加热过程中熔化开始温度。这两条线把  $\text{Cu} - \text{Ni}$  合金相图





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  $\alpha$  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

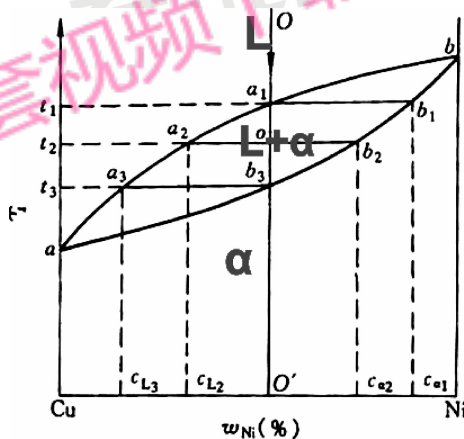
### 1. 匀晶相图分析

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  $\alpha$

### 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  $\alpha$  固溶体, 根据平衡相成分的确方法, 可知液相的成分为  $L_1$ , 固相成分为  $\alpha_1$ 。当温度缓慢冷却至  $t_2$  温度时, 便有一定数量的  $\alpha$  固溶体结晶出来, 此时的固相成分为  $\alpha_2$ , 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  $\alpha_2$  外, 原有的  $\alpha_1$  相也必须改变为与  $\alpha_2$  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,  $\alpha$  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,  $\alpha$  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  $\alpha$  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  $\alpha$  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  $\alpha$  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  $\alpha$ ) 内进行的体内扩散,另一种是  $\alpha/L$  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。

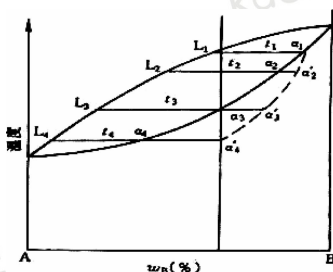


图 5-16 匀晶系合金的不平衡结晶

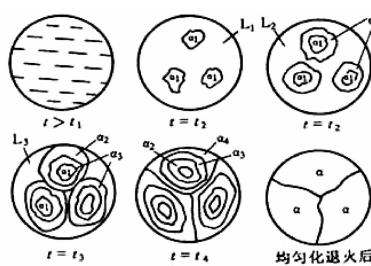


图 5-17 不平衡结晶引起的晶内偏析

#### (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  $\alpha_1$  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  $\alpha_2$ ,它是依附在  $\alpha_1$  晶体的周围生长的。如果是平衡结晶,通过扩散,晶体内部由  $\alpha_1$  成分变化至  $\alpha_2$ ,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  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的平均成分  $\alpha_2'$  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  $\alpha_3$ ,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  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  的平均成分  $\alpha_3'$ ,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  $\alpha_3$ ,而是  $\alpha_3'$ ,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  $\alpha_3'$  变化到  $\alpha_4'$ ,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。

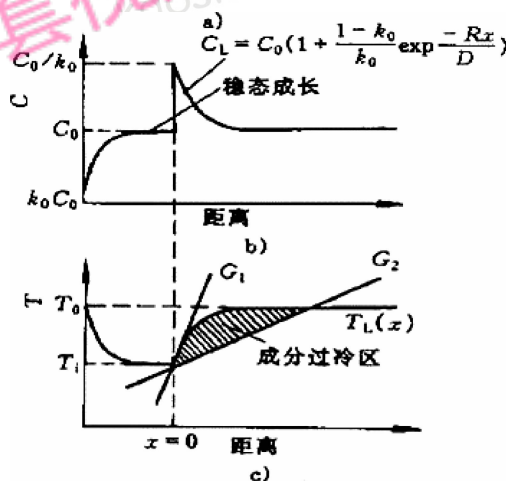


图 6-20 成分过冷的产生示意图

## 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

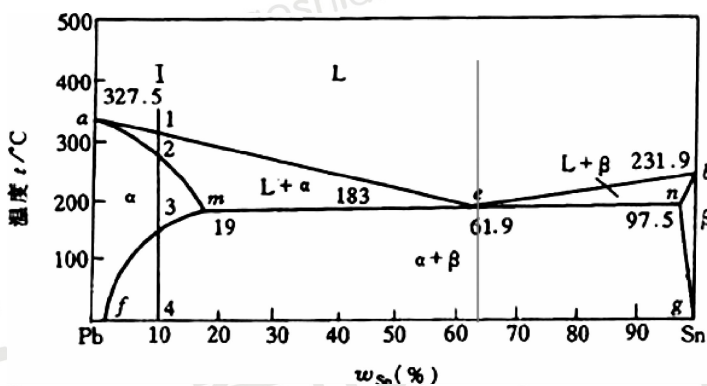
曲线; 共晶转变线。

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  $\alpha$ 、 $\beta$  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  $\alpha$  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  $\beta$  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:

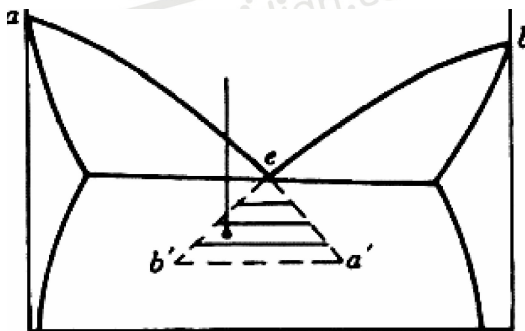
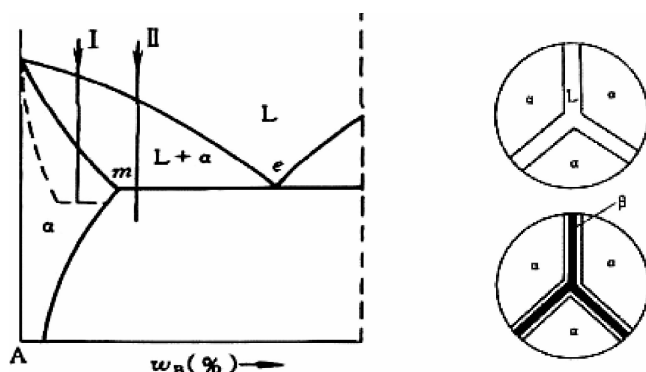


图 5-28 伪共晶区

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  $1000^{\circ}\text{C}$  何  $700^{\circ}\text{C}$ , 含  $w_B =$



0.25 的合金在  $500^{\circ}\text{C}$  结晶完成, 它的平衡组织由 73.3% 的先共晶  $\alpha$  何 26.7% 的  $(\alpha + \beta)$  共晶组成, 并且此合金的  $\alpha$  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

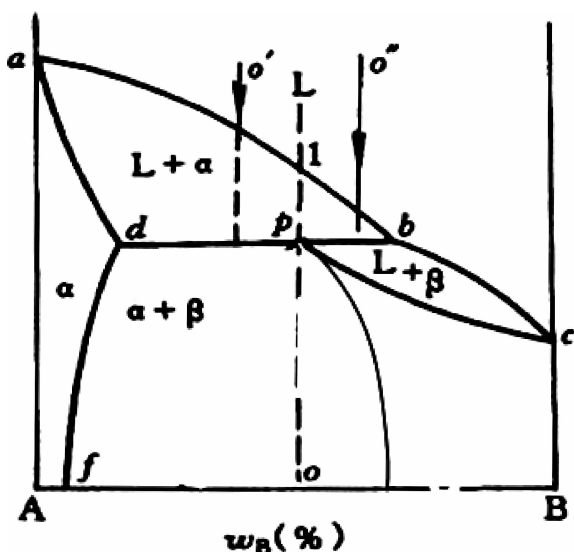
包晶转变, 异常包晶相

### ※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  $\alpha$  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  $\alpha$  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,  $\alpha$  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

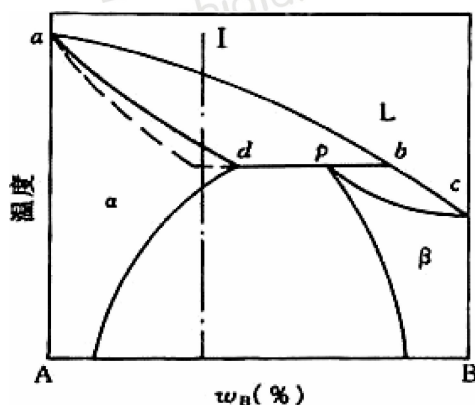


图 5-38 快冷而可能发生的包晶反应示意图

(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  $\beta$  相,从而导致:

- ①部分  $\alpha$  相被保留下来;
- ② $\beta$  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  $\beta$  相(异常包晶相):

### 4. 包晶转变的实际应用

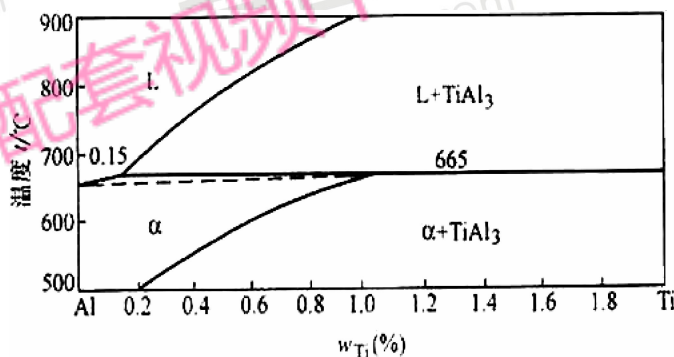


图 3-56 Al-Ti 相图一角

(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  $\text{TiAl}_3$ , ②  $\text{L} + \text{TiAl}_3 \rightarrow \alpha$ ,  $\alpha$  相依附于  $\text{TiAl}_3$  上形核并长大,  $\text{TiAl}_3$  起促进非均匀形核作用。

### 本节名校真题

### 一、填空题：

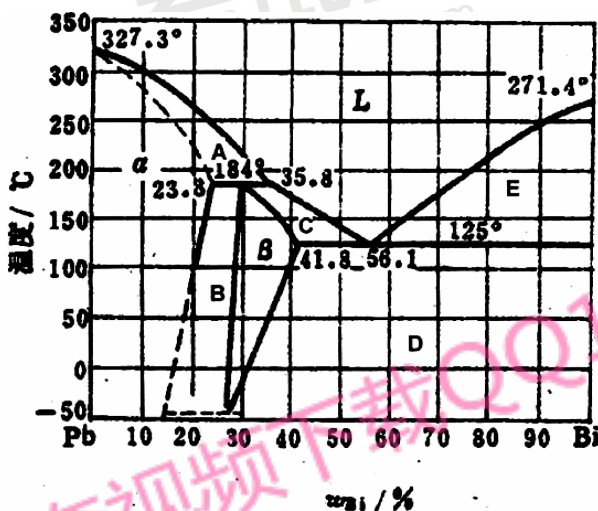
在一定温度下,由一定成分的固相与一定成分的液相作用,形成另一个一定成分固相的过程称为\_\_\_\_\_\_转变。(2011 青岛科技大学)

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  $\beta$  和 (Bi), 其中相  $\beta$  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 +  $[\beta + (Bi)]$  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 - Fe<sub>3</sub>C 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  $\delta$ 。
- (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  $\alpha$ 。
- (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  $\gamma$ 。
- (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 - Fe<sub>3</sub>C 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  $\text{Ac}_m$  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; $0.77\%$

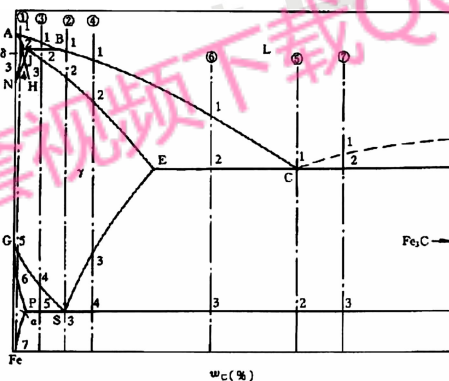
过共析钢; $0.77\% - 2.11\%$

(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

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

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

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

$T_3 \sim T_4: \gamma$

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

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

$727^\circ\text{C}$  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

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

$T_2 \sim T_3: \gamma$

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

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

$727^\circ\text{C}$  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

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



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

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

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

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

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  $\text{Fe} - \text{C}$  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  $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$  相图并完成下列问题。

(1) 在相图中标出各区的组织组成物;

- 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  $\alpha$  相基体上;  $\alpha$  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 W<sub>2</sub>C 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  $\sigma$  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 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 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

KTH350 - 10.

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  $\text{CuAl}_2$ 、 $\text{Mg}_2\text{Si}$ 、 $\text{Al}_2\text{CuMg}$  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  $\alpha$  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)  $\alpha$  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  $\alpha$  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。 $\alpha$  相是固溶体, FCC 结构, 塑性好; 增强相  $\beta$  是以电子化合物  $\text{Cu}_5\text{Sn}$  为基的固溶体, BCC 结构高温塑性好; 增强相  $\gamma$  是以电子化合物  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  为基的固溶体, 硬而脆; 增强相  $\delta$  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  $\varepsilon$  是以电子化合物  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  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。 $\alpha$  相是固溶体, FCC 结构, 塑性好; 增强相  $\beta$  是以电子化合物  $\text{Cu}_3\text{Al}$  为基的固溶体, 增强相  $\gamma_2$  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

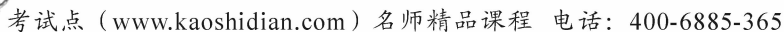
1) 晶体结构: 固态下具有同素异构转变, 在  $882^\circ\text{C}$  以下为  $\alpha\text{-Ti}$ , 具有密排六方结构, 在  $882^\circ\text{C}$  以上为  $\beta\text{-Ti}$ , 具有体心立方结构。

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)  $\alpha$  钛合金: 主要元素是  $\alpha$  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)  $\beta$  钛合金: 合金中含有大量  $\beta$  稳定元素 Mo, 在水冷或空冷条件下可得到稳定均匀的  $\beta$  相。经时效处理, 从  $\beta$  中析出弥散的  $\alpha$  相, 合金强度显著提高, 同时具有高的断裂韧性。 $\beta$  相的淬透性好, 是



3) ( $\alpha + \beta$ ) 钛合金: 合金中同时加入稳定  $\beta$  和稳定  $\alpha$  的元素, 使  $\beta$  和  $\alpha$  都得到强化。在水冷或空冷条件下可得到稳定均匀的  $\beta$  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  $\alpha$  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:

- ## 二、判断题：

- ### 三、填空题:

- 四、论述铝合金的主要强化方式。(2012 华南理工大学)

120