

哈尔滨工业大学

825 金属学与热处理

考试点
kaoshidian.com

铁素体 F 奥氏体 A

First section:

金属与合金的晶体结构, 金属的结构

1. 金属的三种典型晶体结构及其特点
2. 掌握晶向指数和晶面指数的标注方法
3. 晶体缺陷的三种类型
4. 合金的相结构, 固溶体
5. 纯金属结晶的理论和应用

1. 晶体的多晶型性

$\alpha\text{-Fe}$ 912°C $\gamma\text{-Fe}$ 1674°C $\delta\text{-Fe}$

体心立方 面心立方 体心立方

晶格指数	晶胞参数	n	γ	K	配位数	$V_{\text{晶胞}}$	间隙类型	数目	密排面堆垛方式	γ_{B}
bcc (体心)	$a=b=c$	2	$\frac{\sqrt{3}}{4}a$	0.68	8	a^3	四面体 八面体	$\frac{6}{12}$		$\frac{0.1259}{0.0672}$
fcc (面心)	$a=b=c$	4	$\frac{\sqrt{2}}{4}a$	0.17	12	a^3	四面体 八面体	$\frac{4}{8}$	ABCABC	$\frac{0.089}{0.1469}$
HCP (密排)	$a=b \neq c$ $\alpha=\beta=90^\circ \neq \gamma=120^\circ$	6	$\frac{1}{2}a$	0.17	12	$\frac{\sqrt{3}}{2}a^2c$	四面体 八面体	$\frac{6}{12}$	ABAB	同上 至 4 号

or:

在铁碳合金里 $\gamma\text{-Fe}$ 比 $\alpha\text{-Fe}$ 中 C 溶解度大的原因: $\gamma\text{-Fe}$ 中间隙八面体间隙 0.0535nm

C 半径 0.071nm, $\alpha\text{-Fe}$ 中 C 在八面体间隙 0.01362nm, 由四面体间隙移动性差

C 在八面体间隙中

Fe 在 912°C 由 $\alpha \rightarrow \gamma$, 求体积变化百分率

两个 bcc 变成一个 fcc, 原子半径不变 体积变化百分率 $\frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100\%$

$$\frac{2 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{\frac{4}{3} \pi R^3} = \frac{2}{1} \times \frac{r^3}{R^3} = 2 \times \frac{1}{1} = 2$$

Date _____ Page _____ 平行的面为同一晶面。

(6分)

3. 晶向指数和晶面指数 ()

晶向指数所指的是一族平行线的位向, 即所有相互平行的晶向, 都是有相同的晶向指数

$$\{uvw\} // \{hkl\} \quad u=h, v=k, w=l \quad \text{平行}$$

$$uh+vk+wl=0 \quad \text{垂直}$$

晶带: $hu+kv+lw=0$

已知晶面的指数分别为 (h_1, k_1, l_1) 和 (h_2, k_2, l_2) 则其晶带轴指数 (u, v, w)

按下式求

$$u = k_1 l_2 - k_2 l_1$$

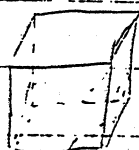
$$v = l_1 h_2 - l_2 h_1$$

$$w = h_1 k_2 - h_2 k_1$$

$$(103)$$

$$(103)$$

$$(103)$$



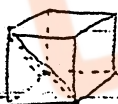
$$[111]$$

例: $(11\bar{1})$ $(1\bar{2}1)$ $(\bar{3}21)$ $(\bar{1}\bar{1}2)$ $(11\bar{2})$ 判断以上四个晶面那此是 $(11\bar{1})$

例: 由指数画图, 由图面指数已知纯 Cu 滑移系为 (111) 晶面的 $(\bar{1}10)$ 滑移切应力

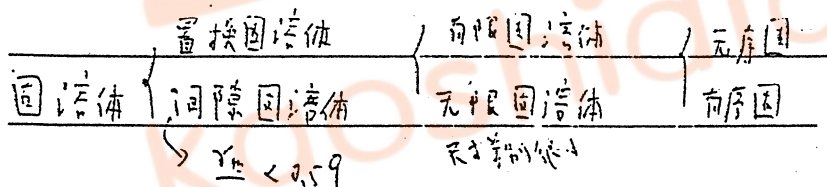
1MPa, 要使 $(\bar{1}11)$ 上位错沿 $[101]$ 滑移至少需在 $[001]$ 晶向加多大应力, 在 $(\bar{1}11)$ 晶位错能否沿 $[110]$ 晶向滑移。

$$(\bar{1}11)$$



合金的相结构

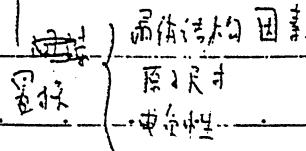
本质: 固溶体, 金属化合物



有限

间隙

影响固溶体溶解度的因素



$$\delta r = \left| \frac{r_1 - r_2}{r_0} \right| \times 100\%$$

固溶强化：随溶质浓度增加，硬度、强度↑，塑性、韧性↓

二、金属间化合物

分类	正常价	$21/13$ 合金与晶格 γ 相 (Cu_2Zn)
	电子化合物 $C = \frac{e}{a}$	$21/12$ 密排六方晶格 ϵ 相 $(MgZn)$
	间隙	$21/14$ 时具有体心立方晶格 简单 β 相 $(FeZn)$
	间隙相	面心立方晶格
	间隙化合物	合金间隙体

第二相强化

间隙相与间隙固溶体区别：① 固溶体与基体元结构相同。

三、实际金属的晶体结构 (晶体缺陷)

1. 点缺陷

对性能影响：加在金属中

的扩散，

屈服强度。

空位：有脱位空位 数量小 迁移到晶内表面
弗伦克尔空位：大 迁移到晶格的间隙

点缺陷与缺陷

高浓度空位

高浓度

增加

间隙原子：同类型
杂质

置换原子

2. 线缺陷

刃型位错 螺型位错

3. 柏氏矢量

柏氏回路求柏氏矢量法 由柏氏矢量判断位错的性质

矢量与位错线：垂直 → 刃型 $\uparrow \vec{b} \quad \uparrow \vec{t}$
平行 → 螺型

平行同相右螺 反左螺

右手食指位错方向，中指矢量，拇指向外为正刃型。有刃型和螺型为复合型位错

Date _____ Page _____

4. 面缺陷:

1. 晶体表面: 表面能 σ
 2. 晶界: $\left\{ \begin{array}{l} \text{大角晶界} > 10^\circ \\ \text{小角晶界} < 10^\circ \end{array} \right.$ 位错滑移
 3. 亚晶界 $< 2^\circ$

性能: ① 高能状态, 长大, 平直化

② $\sigma_s \uparrow$ $H_B \uparrow$ 比内部

③ 熔点低, 抗腐蚀性 \downarrow 抗老化 \downarrow 析散 \uparrow

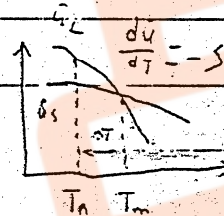
④ 内吸附: 能 \downarrow 表面能的原子向晶界吸附

四. 纯金属的结晶

1. 宏观现象

过冷度 $\Delta T = T_m - T_n$ 金属结晶必要条件

$V_L \uparrow \Delta T \uparrow$



规律: 形核(均匀, 非均匀) \rightarrow 长大

2. 均匀形核

$$\Delta G = -V \Delta G_v + \sigma A = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \sigma$$

$r < r_k$ 时 $r \uparrow \Delta G \uparrow$ 长大不能自发进行

$r > r_k$ 时 $r \uparrow \Delta G \downarrow$ 长大可自发进行

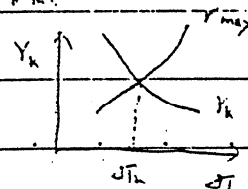
r_k 临界晶核

$$\frac{d\Delta G}{dr} = -4\pi r^2 \Delta G_v + 8\pi r \sigma = 0 \Rightarrow r_k = \frac{2\sigma}{\Delta G_v}$$

ΔG_v 与过冷度有关:

$$\Delta G_v = L_m \frac{\Delta T}{T_m} \quad L_m \text{ — 熔化潜热} \quad T_m \text{ — 熔点}$$

$$r_k = \frac{2T_m \sigma}{L_m \Delta T}$$



液相金属的结构起伏 \rightarrow 非平衡过程

果 + 12.11 ... σ ΔT r_k ΔT

求出 ΔT_k 临界过冷度

$$\Delta G_k = \frac{1}{2} \sigma_s \sigma_k$$

临界形核功为表面自由能的 $\frac{1}{2}$ 由能量起伏提供均匀形核的条件:

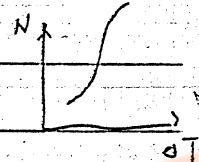
① ΔT_k ② 结构起伏 γ_k ③ 临界形核功 ΔG_k 能量起伏

3. 非均匀形核

$$\Delta G' = \Delta G f(\theta) \quad f(\theta) = \frac{2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta}{4}$$

$$\gamma_k' = \frac{2\sigma_s L}{\Delta G_v} = \frac{2\sigma T_m}{L_m \Delta T}$$

$$\Delta G_k = \frac{1}{2} \sigma_s \sigma_k L \cdot f(\theta) \quad \Delta G_k' < \Delta G_k \quad \text{形核率: } N \propto \Delta T$$



4. 晶核长大

条件: ΔT T (过)

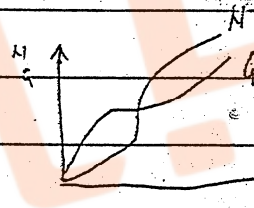
长大方式: ① 晶面结构

粗大造 $\left\{ \begin{array}{l} \text{正T} - \text{平面长大} \\ \text{负T} - \text{树枝状长大} \end{array} \right.$
光滑

② 界面前沿温度梯度 $\left\{ \begin{array}{l} \text{正} \\ \text{负} \end{array} \right.$

长大速度: $G \propto \Delta T$

例如: 假设晶核为正方体 a 求 T_k ΔG_k ΔT_k



5. 结晶理论的应用 — 控制晶粒尺寸的方法

$\gamma_k \downarrow$ $N \uparrow$ $G \downarrow$ (长大速度)

① $\Delta T \uparrow$ $N/G \uparrow$ $d \downarrow$

② $\sigma \downarrow$ 非均匀形核 变质处理 加入长大抑制剂 $G \downarrow$ $d \downarrow$

③ 振动 搅拌

二. 二元合金相图和合金凝固

相图是表示合金系中的合金状态与温度、成分之间关系的图例。

1. 三种基相图

2. 合金在平衡条件下结晶过程, 得到的组织

3. 合金在非平衡条件下结晶过程

一. 相图的特征

重点: 固溶体合金溶质分布 (异分结晶), 成分过冷

1. 固溶体相图

2. 共晶相图

3. 合金相图

类型	反应式	相图特征
分解: 共晶	$L \xrightarrow{t_c} \alpha + \beta$	
共析	$\gamma \xrightarrow{t_c} \alpha + \beta$	
包晶	$L + \alpha \xrightarrow{t_c} \beta$	
包析	$\gamma + \alpha \xrightarrow{t_c} \beta$	

二. 固溶体合金的异分结晶

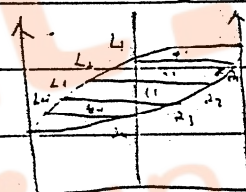
异分结晶: 结晶出的结晶体与母相化学成分不同的结晶

平衡时分配系数 $k_0 = \frac{L_0}{\alpha_0}$

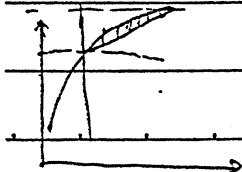
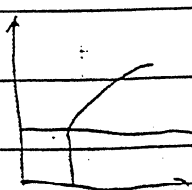
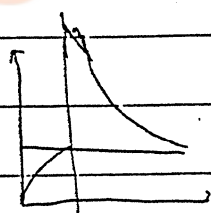
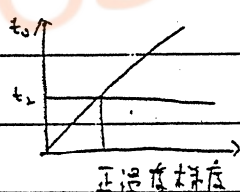
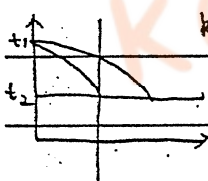
区+枝偏析: 化学成分不均匀。

原因:

利用: 区+枝偏析, 逐次精炼, 顺次凝固。



三. 成分过冷及其对合金形变的影响



成分过冷: 由成分变化引起的过冷度.

不便于结晶. 液相同相. 不能成分扩散.

影响 factor: ① 液相浓度梯度

② k_0 ($k_0 < 1$ 时 k_0 越小, 过冷越严重, $k_0 \rightarrow 1$, 越大, 过冷越小).

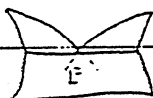
④ 不平衡结晶

1. 枝晶偏析: 先结晶的高熔点组元多 (支干高, 支芽低)

成分不均匀使塑性 ↓

消除扩散退火, 长时间保温

2. 伪共晶:



3. 离异共晶: 可以在不平衡和不平衡条件下形成

平衡条件下形成的用扩散退火消除

五. 固溶体合金与纯金属结晶的异同点

相同: 需 ① 临界过冷度 ② 形核剂 ③ 能量起伏, 结构起伏.

不同: ① 固溶体成分起伏.

② 纯金属在恒温下结晶 (自由度为 0, 固为 1)

③ 长大方式不同

六. 基本定律:

相律 $f = C - P + 1$ 平衡条件

自由度 f 平衡相

Section Three 铁碳合金

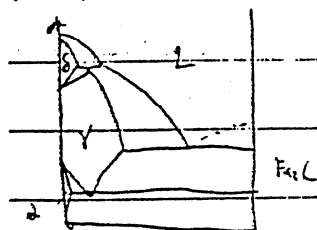
一. 理解相图组织

二. 铁碳相图的分析

三. 杠杆定律的计算

Date _____ Page _____

四. 含碳量对 平衡组织及机械性能的影响.



组元, 基本相: 1. 组元: Fe , 熔点 1538°C . 912°C $\alpha\text{-Fe}$ 体

$\gamma\text{-Fe}$ 面

1734°C $\delta\text{-Fe}$ 体

磁性转变是 770°C .

C 溶于 $\alpha\text{-Fe}$ 铁素体 F $< 0.02\%$

$\gamma\text{-Fe}$ 奥氏体 A 1148°C 时最大 2.11 727°C 时 0.77

顺磁性, 铁磁性

② Fe_3C 硬, 脆

三. 工业上常用的方面.

四. 含碳量对铁碳合金平衡组织及性能的影响.

① 平衡: ① 渗碳体种类 (五种), 形态, 含碳量

② 含碳量 0.09 的钢硬度低, 强度高

硬度 (致密) 平衡 (硬度)

有大量 Fe_3C 不可锻

③ 1100°C 含碳 0.49 钢可锻, 含碳 40% 的钢不可锻

五章 三元合金相图

1. 成分三角形又有特定意义的连线

2. 定律

六章 金属的塑性变形与再结晶

6.1. 一般特征

6.2. 单晶

1. 滑移 2. 滑移系 3. 临界分切应力 4. 晶粒转

6.3. 多晶

1.4 特征: ① 不同时效性 ② 不均匀 ③ 协同性

晶粒大小对塑性变形的影响

霍尔-佩奇公式 $\sigma_s = \sigma_0 + k d^{-1/2}$

6.4. 塑性变形对组织与性能影响

① 显微组织: 纤维组织

② 亚结构: 位错网络

③ 变形结构

④ 残余应力

⑤ 宏观
⑥ 微观

6.5. 对性能影响

钢丝 断裂

温度: 低温产生 回复, 再结晶

6.5.

1. 回复: 位错组态 — 弥散化

2. 再结晶: $T_{再} = (0.35 \sim 0.42) T_{再} (K)$

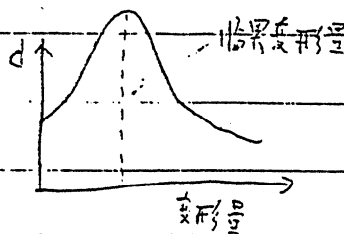
影响因素:

① 变形度

② 纯度 — 杂质 — 再结晶温度 ↑

③ 晶粒尺寸

④ 时间



Date

Page

6.6. 热加工

一. 定义

动态的回复与再结晶

△ 二. 影响:

① 改善金相组织

② 形成纤维组织 (与冷加工区别: 冷加工由拉长的晶粒组成)

③ 带状组织: (轧制)

④ 魏氏组织 (防止消除)

6.7 超塑性

组织要求: ① 超细化 $< 10\mu m$

工艺要求: ① 确定温度, 在再结晶温度附近

② 变形速度: 较低

七. 钢在加热和冷却时转变

7.1 钢加热时的转变

二. 奥氏体形成过程

1. 形核:

2. 长大: (碳含量分布)

$(\gamma-\alpha)$

$(\gamma-\epsilon)$

3. 残余渗碳体溶解

4. 成分均匀

成分单一的奥氏体

三. 影响奥氏体形成速度 (析散相速度)

① 加热温度

② 原始P组织形态

③ 化学成分

④ C

⑤ 合金元素

析散速度

临界温度

晶粒度: 单位面积上的晶粒度

起始:

实际

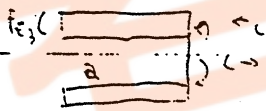
加热

1.4 P转变

ΔT_c

一. P组织形态及性能, (卡问题同)

板状 领先相: 可作假设其中一个为合金相)



(合金相)



形成P的机理

在 δ 中

片状 δ 相的析出

马氏体转变 (析出转变)

(在临界冷却速度: 冷却, 析出析散)

一. 马氏体的组织形态和晶体结构

1. 板条: 位错胞 (与塑性变形时的位错胞相似)

相变形成

马氏体形成

合金量低

2. 片状 含C量高 奥氏体

1. 4. 性能

在钢中分布

1. 6 马氏体转变

1. 8 钢的回火转变及合金时效

2. 组织

1. 马氏体中的C的偏聚

2. 马氏体的分解

✓ 针状铁素体和状状碳化物 回火马氏体

3. 回火 A 转变

4. 碳化物转变

正火 亚稳相 → 平衡相

针状物 + 状状碳化物 回火马氏体

九章 钢的热处理工艺

预备热处理：退火、正火

退火：(一种平衡转变) 缓慢冷却 水淬

分类：1. 均匀化退火 (固相线下 100°C) 高温

完全退火 ($A_{c1} + 30^{\circ} \sim 50^{\circ}$) A_{c1} 温度 (亚析钢)

2. 不完全退火

球化退火 ($A_{c1} + 30^{\circ} \sim 50^{\circ}$) (过共析钢) 得到珠光体+铁素体 } 球化退火
球化退火+高温

退火通过相变细化晶粒

再结晶退火 (再结晶温度 $+100^{\circ}\text{C}$)

回火退火

正火：空冷 (得到伪共析组织) 与退火 (平衡) 区别

对于亚共析钢

过共析钢 (网状碳化物用正火消除) 最终热处理状态

最终热处理：淬火、回火

淬火组织：马氏体 + 残余奥氏体 + 未溶碳化物 (球化退火)

复形：应力

回火 { 低温 中温 高温 } 结合退火工艺

回火时间 不少于 2 小时 组织