

**2016 年研究生入学考试专业课资料**

**Graduate Entrance Examination**

**长安大学**

**材料科学基础笔记**

**GEE 考试专业课内部复习材料**

**学府考研高端辅导专业定制**



## 第一章 材料结构的基本知识

## §1-1 原子结构

## 一. 原子中的电子分布

1. 原子的核式结构 原子核 + 电子

2. 电子分布 ① 四个量子数

主量子数  $n$ : 电子远近 能量  $n=1-7$  决定能量次量子数  $l$ : 亚壳层数 能量  $l=0, 1, 2, \dots, (n-1)$  决定能量形状磁量子数  $m$ : 电子轨道的可能取向 决定取向自旋量子数  $m_s$ : 自旋的方向数  $m_s = \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$  自旋电子

② 两条基本原理 a) Pauli 不相容原理: 一个原子中不可能有两个电子具有完全相同的

b) 能量最低原理: 电子总是优先占据能量最低的轨道使系统处于最低能量状态

③ 能级交错: 相邻主壳层的能量出现有能量

④ 元素的填充程度: 外壳层的  $s, p$  是否填满

## 二 元素周期表及性能的周期性

## 1. 电子分布的周期性

## §1-2 原子结合键

一次键: 离子键, 共价键, 金属键

二次键: 氢键, 范德瓦耳斯键

一. 一次键——通过电子转移或共享使两个原子结合

1. 离子键  $NaCl$ 2. 共价键:  $C$   $1s^2 2s^2 2p^2$  饱和性 8-10, 方向性 (键间等角度最大; 稳定性 由方向性, 不允许改变原子间相对位置, 所以材料不易塑性比较坚韧)

3. 金属键: 正离子沉浸在电子云中

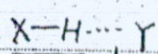
二. 二次键——靠偶极的吸引使原子成键结合



1. 范德瓦尔斯键

临时偶极子

2. 氢键



永久偶极子

氢键

氢键

## 三. 混合键

1. 一次键的混合

共价键 + 金属键

C Si Ge Sn Pb

离子键 + 金属键

金属间化合物 Ni<sub>3</sub>Al

离子键 + 共价键

X<sub>A</sub>:X<sub>B</sub> — 电负性

★

$$\rightarrow \text{离子键比例} = (1 - e^{-\frac{1}{4}(X_A - X_B)^2}) \times 100\%$$

例: 判断  $CaO$ ,  $SrO$ ,  $GdAl$ ,  $CuAl$  以离子键或共价键为主

$$e^{-\frac{1}{4}(X_A - X_B)^2} = \frac{1}{2}$$

结果

2. 一次与二次键间的混合

① 石墨: 共价键 范德瓦尔斯键

② 高分子材料: 共价键与二次键

四. 结合键的本质及原子间距  $r_0$ 双原子模型: 平衡距离  $r_0$ 

$$\text{结合能: } F = -\frac{dE}{dr}$$

$$E = -\int_0^{\infty} F dr$$

结合能: 离子键 &gt; 金属键 (电负性最大) &gt; 共价键 &gt; 范德瓦尔斯键

## 五. 结合键对性能的影响

1. 对物理性能:

熔点:  $E_0 \uparrow \rightarrow T_m \uparrow$ 

密度: 金属最高, 原子最大, 键性

★

电导: 金属高, 自由电子

陶瓷次之

陶瓷

离子键

离子键最低

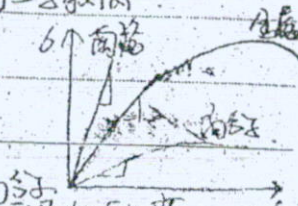
高分子

分子的热振动

6个面

弹性模量:  $E = \frac{G}{\epsilon}$ 

E 取决于结合键强度: 陶瓷 &gt; 金属 &gt; 高分子





塑性、韧性：金属最好，陶瓷最差

强度：陶瓷较高，与组织有关（如合金强化等）

### §3. 原子排列

1. 晶体——其中原子（原子团、分子）在空间有规则的周期性重复排列的固体

2. 非晶体

3. 对性能的影响：各向异性与各向同性

晶体 非晶体

有Tm 无Tm

结晶过程：原子从无规则的排列到规则的排列

→ 形核 + 核长大

单晶体：一个晶核长大而成

各向异性

多晶体：由多个晶核长成的

伪各向异性 → 统计平均（各相同性）

### 二. 晶体测定

1. XRD — X Ray Diffraction

晶体有锐利衍射峰

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

而非晶体没有

2. 透射电子显微镜 TEM

### §1-4 材料的组织

相：材料中成分相同、结构相同、性能相同，并且其他部分有界面隔开的物质部分

组织：对组成材料的相的种类、多少、大小、形状、分布特点等进行描述，特征相同的都称为一种组织

平衡态共析钢 相：F + Fe<sub>3</sub>C

组织：



No.

Date

## 一. 单相组织与多相组织

1. 单相组织

2. 多相组织

## 二. 组织对性能的影响

### 三. 组织的显示与观察

1. 金相试样的制备

磨平 → 磨光 → 抛光 → 腐蚀

2. 观察

光学金相显微镜 (倍率小) (景深小)

扫描电显微镜 (倍率高) (景深大)

## 五. 材料的亚稳结构与亚稳态结构

一. 亚稳态结构: 一种处于能量最低的结构

亚稳态结构: 一种处于能量较高的结构

例如: 马氏体钢  $\begin{cases} P \text{ (珠光体) 稳定} \\ M \text{ (马氏体) 亚稳} \end{cases}$

## 二. 结构转变的条件

1. 热力学条件: 转变的方向, 能量下降

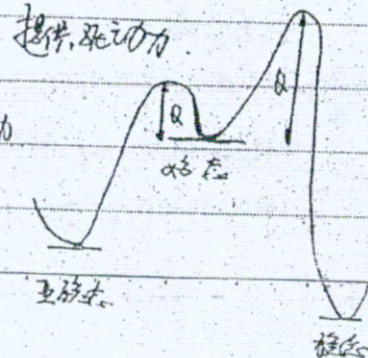
2. 动力学条件: 转变的速度

转变后的自由能 — 转变前的自由能  $< 0$

亥姆霍兹自由能:  $\Delta A(T, V) = U - TS < 0$

吉布斯自由能:  $\Delta G(T, p) = H - TS < 0$

速度:  $V = Ae^{-\frac{Q}{RT}}$ ,  $\begin{cases} Q - \text{激活能 (J/mol)} \\ R - \text{气体常数} \\ A - \text{常数} \end{cases}$





### 三 材料的性能与状态

若析钢 A (奥氏体)  $\leftarrow$  慢冷 (P) 珠光体 综合性能良好  
快冷 (M) 马氏体 硬而脆

四 亚稳态向稳定态的转变：必须原子有足够活动能力时，提下才能实现。而在常温下，转变难以进行。



## 第二章 材料的晶体结构

### § 2-1 晶体学基础

一、晶体  $\rightarrow$  点阵  $\rightarrow$  晶格  $\rightarrow$  晶胞

晶胞：由几何条件在三维空间内用直线连接起来形成空间格架。将晶体中的原子或分子按一定规律排列成点阵，晶胞在三维空间内有规律排列。

晶格：由点阵用一系列相互平行的直线直接联系起来形成空间格架。

晶胞：构成晶体的最小单元。

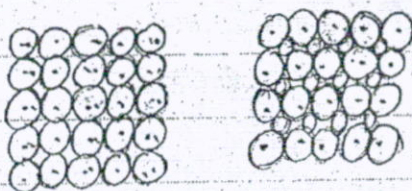
点阵 + 基元 = 晶体结构

基元：晶体中规则排列的原子单元。

晶胞：晶体中最小的重复单元。

初基晶胞：与基元相符合。

周围环境完全相同 —— 即可作基元。



基元：① ②

选取晶胞的原则：  
① 尽可能反映晶格的对称性  
② 尽可能反映点阵的不均匀性  
③ 体积最小

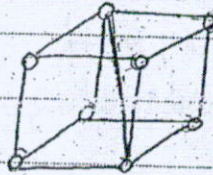
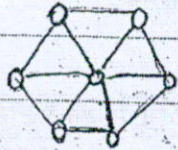
材料 晶体



No.

Date

4. 惯用晶胞: 1. 简单晶胞 (简单晶胞) — 包含一个阵点  
 2. 复杂晶胞 — 包含多个阵点



5. 表征晶胞参数

形状: 晶格常数  $a, b, c$  (相等还是不等)

晶轴夹角:  $\alpha, \beta, \gamma$  (相等还是不等)

6. 点阵矢量 — 描述点阵中各点阵的矢量  $\vec{r} = u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c}$

基矢:  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  系数:  $u, v, w$

7. 七大晶系: 按晶胞形状特点分七大类

8. 14种布拉菲点阵

二. 晶向指数和晶面指数: ☆☆☆☆☆

1. 晶向指数:

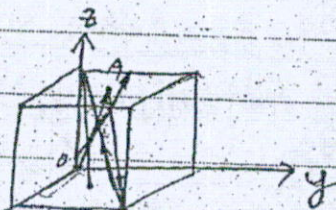
① 晶向: 阵点或原子列的方向

② 晶向指数: 不同方向的晶向的一组数字

③ 晶向指数的标定方法: 1. 定坐标 (坐标原点一定要在晶向上) 2. 求投影 (以晶格常数为单位) — 如:  $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1$

3. 化整数: 1 1 2

4. 加括号 [ ] : 即 [112]



讨论: (1)  $[u, v, w]$  代表的不是一个晶向, 而是同向平行的无数个

(2)  $[\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}]$  与  $[u, v, w]$  反向平行

(3) 晶向族  $\langle u, v, w \rangle$  代表原子排列情况完全相同, 但方向不同的一组晶向

立方晶系:  $\langle 100 \rangle = [100] + [010] + [001] + [\bar{1}00] + [0\bar{1}0] + [00\bar{1}]$



## 二 晶面指数

① 晶面——阵点面或原子面

② 晶面指数：表示不同方位的晶面的，一组数 (密勒指数)

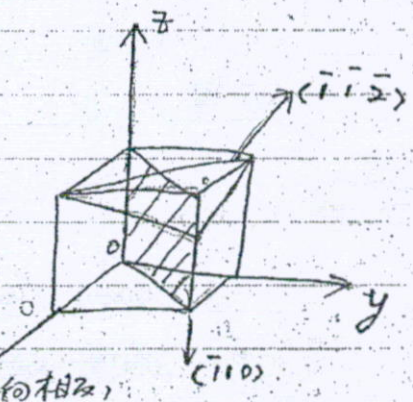
③ 确定方法：1) 定坐标：

2) 求截距：以晶格常数为单位。

3) 取倒数

4) 化整数

5) 加括号 ( )



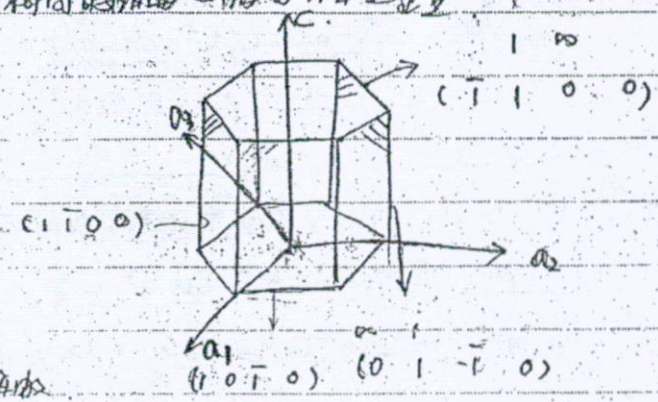
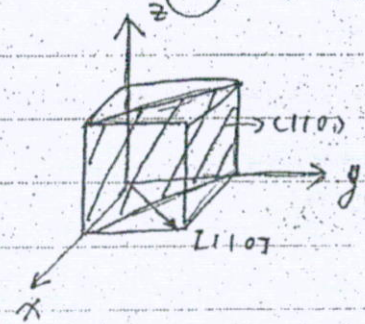
例如：(1) (hkl) 代表无数个平行的面。

(2)  $(\bar{h}\bar{k}\bar{l})$  与  $(hkl)$  反向平行 → 反向相反。

(3) 晶面族  $\{hkl\}$  代表原子排列情况完全相同但方位不同的。

立方晶系  $\{100\} = (100) + (010) + (001) + (\bar{1}00) + (0\bar{1}0) + (00\bar{1})$

(4) 立方晶系中，指数相同的晶面与晶向相互垂直。



## 三 立方晶系的晶向指数与晶面指数

① 晶面指数：密勒指数与晶面指数。

(a) 坐标：四轴坐标  $\{11\bar{2}0\}$   $(hkl\bar{l}) \Rightarrow \bar{l} = -(h+k)$

② 晶向指数：标定方法：a) 移步法

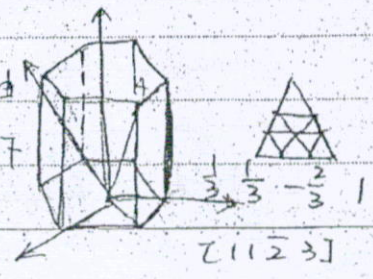
坐标原点出发，依次沿  $a_1, a_2, a_3, c$  轴

1° 移步  $[u, v, w]$  在  $u = -(v+w)$  的条件下

走到新的晶向上的一点。

2° 化简

3° 加括号





(b) 坐标换算法:

$$[UVW] \Rightarrow [u.v.t.w]$$

$$u = (2U - V) / 3$$

$$v = (2V - U) / 3$$

$$t = -(U + V) / 3$$

$$w = W$$

(c) 正射投影坐标法

从待测晶面作一垂线(箭头)

1° 向  $a_1, a_2, a_3$  坐标轴作正投影, 沿某四个投影值乘以  $\frac{3}{2}$ ~~乘以~~

2° 化简

3° 加括号

## 三 晶带及晶带指数

1. 晶带——晶体中同时平行于某一晶面的所有晶面

晶带轴: 这个晶面的法线  $[u.v.w]$ 2. 晶带定理: 晶带面  $(h.k.l)$  晶带轴  $[u.v.w] \Rightarrow hu + kv + lw = 0$ 

3. 应用举例:

例1:  $(h_1, k_1, l_1)$  与  $(h_2, k_2, l_2)$  不平行, 求相交线的晶带指数解:  $(h_1, k_1, l_1) \times (h_2, k_2, l_2)$ 

$$\text{如: } (100) \times (010) = \begin{vmatrix} i & j & k \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 0i + 0j + 1k = [001]$$

例2:  $[u.v.w], [u',v',w']$ 例3:  $(110), (111)$  把这两个晶面中的其他晶面写出来 (4个)解1: 用晶带定理求  $[u.v.w]$ 解2: 任意两个晶带面相交  $\rightarrow (2, 2, 1) (2, 3, 1)$   
(100)

四 晶面间距 (一组平行的晶面中最相邻两面的距离)

公式: 立方晶系  $d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$ 

$$\text{四方晶系: } d_{hkl} = \frac{1}{\sqrt{\frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}}}$$

$$\text{正交晶系: } d_{hkl} = \frac{1}{\sqrt{\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}}}$$

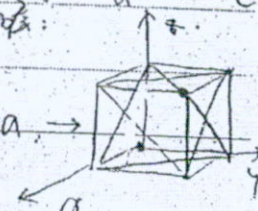
$$\text{立方晶系: } d_{hkl} = \frac{1}{\sqrt{\frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2}}}$$

适用于简单晶胞, 对于复杂晶胞, 注意:

$$FCC: d_{100} = a/2$$

$$d_{111} = \frac{\sqrt{3}}{3} a$$

$$BCC: a/\sqrt{2}$$



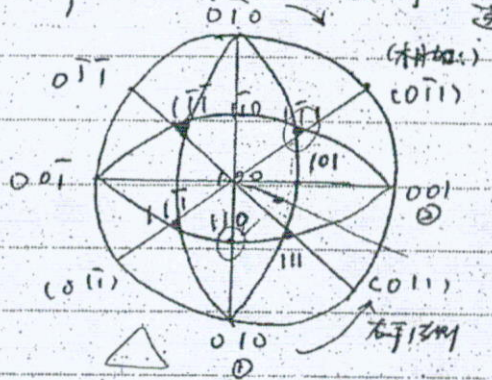
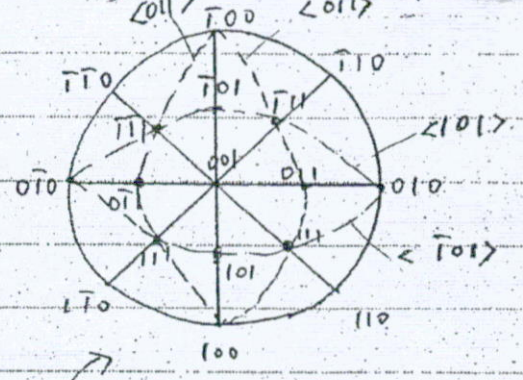


\* 得到：面心立方 (100)  $\rightarrow d_{100} = \frac{a}{2}$

五. 晶体的标准投影图

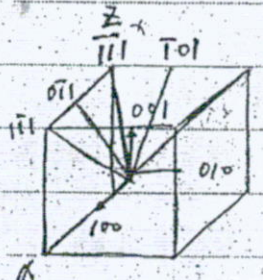
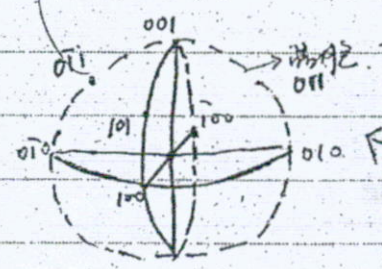
板射正、侧投影 [所有晶面和晶面都通过原点]

1. 两晶面的中间点  
2. 任意点 (00, 01, 01) 连三点



立方晶系 [001] 标准投影图

立方晶系 [100] 标准投影图



\* FCC {111} <110>  
海群 (111) 为对称面, ABC (111) 点  
如其对称面, 111 (110) 为对称面  
111 (110) 点由其对称面

§2-2 纯金属的晶体结构

晶体结构 = 点阵 + 基元

一. 金属的典型结构

1. BCC: 体心立方  $\alpha$ -Fe,  $\delta$ -Fe, Cr, W

2. FCC: 面心立方 Al, Cu, Ni,  $\gamma$ -Fe

3. HCP: 密排六方 Mg, Zn

这个上为最角

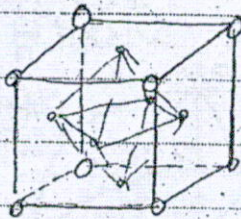
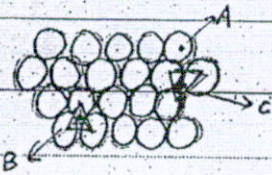
单位体积中, 原子所占体积的百分数

晶体结构	密排面	密排方向	堆垛方式	原子半径	原子数	原子体积	原子所占体积的百分数
BCC	{110}	<111>	ABCABCABC	$\frac{\sqrt{3}}{4}a$	2	8	0.68
FCC	{111}	<110>	ABCABCABC	$\frac{\sqrt{2}}{4}a$	4	12	0.74
HCP	(0001)	<1120>	ABABAB	$\frac{a}{2}$	6	12	0.74



No.

Date



	原子半径	个数
cc 正四面体	0.414	4
cc 正四面体	0.225	8
cc 四面体	0.155	6
cc 四面体	0.291	12

## 二. 晶体的多晶型性 (同素异构)

1538°C	原相变	1. 温度与压力的影响
$\delta\text{-Fe}$ bcc		热胀冷缩 $\rightarrow$ 原子可压缩
1394°C		
$\gamma\text{-Fe}$ fcc		2. 结合键的影响
912°C		强 $\rightarrow$ 大
$\alpha\text{-Fe}$ bcc		3. 溶剂的影响
		高 $\rightarrow$ 半径大
		4. 价电子的影响: 周期律变化

## § 2-3. 离子晶体的结构

1. 离子半径	$R_0 = R^+ + R^-$	(鲍林法) — 离子晶体半径
单价离子	$R_i = \frac{a}{z - 0}$	鲍林: 最外层电子决定
		$z \rightarrow$ 原子序数
		$0 \rightarrow$ 屏蔽常数
多价离子	$R_w = R_i(W)^{-1/6}$	



## 2. 配位数——与一离子相邻的异号离子的数目

 $R^+/R^-$ : 配位数 负离子配位多面体的形状

0-0.155

2

哑铃状



0.155-0.225

3

正三角



0.225-0.414

4

四面体



0.414-0.732

6

八面体



0.732-1

8

立方体



1

12

## 3. 离子键——负离子堆积骨架，正离子填入负离子配位多面体中心

离子键的实质：在离子晶体中，每一个离子或原子核周围吸引着各负离子中心线所构成的多面体

## 三. 离子晶体的结构规则

 $R^+/R^- \rightarrow r^+/r^- \rightarrow$  半径比

1. 鲍林第一法则——负离子配位多面体的形状——负离子配位多面体

2. — — — — — 电荷规则：与一个负离子连接的负离子配位多面体不

3. — — — — — 连接规则：C尽量远离

## 四. 离子晶体的典型结构

1. NaCl型：NaCl, MgO, FeO, NiO

(配位数: 6) 1:1 面心立方堆积

2. CsCl型：CsBr, CsI, Cs2

(配位数: 8) 1:1 简单立方堆积

3. 立方ZnS型：GaAs, AlP

(配位数: 4) 1:1 面心立方堆积

4. 立方ZnS型：ZnO, SiC

(配位数: 4) 1:1 简单立方堆积

5. CaF2型：ZrO2, TiO2, Mg2Si

Fcc 8:4 四面体空隙

6. TiO2型：VO2, NbO2, MnO2, SnO2

## §2-4. 共价晶体的结构

一. 共价晶体的特征：方向性 饱和性

二. 共价晶体的典型结构



1. 金刚石型: Si, Ge, Sn

2.  $ZnS$  型3.  $SiO_2$  型

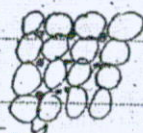
## 第三章: 晶体缺陷

## §3-1. 点缺陷

## 一. 类型:

空位——肖脱基缺陷

空位-间隙原子——弗伦克尔缺陷

离子晶体 (电中性原则)  $\left\{ \begin{array}{l} \text{肖: 同时少掉一个正负离子} \\ \text{弗: 正负离子或离子移动到其互地方} \end{array} \right.$ 

## 二. 平衡点缺陷与非平衡点缺

1. 点缺陷的平衡浓度:  $c_e = \frac{N_e}{N + N_e} \approx \frac{N_e}{N} = A e^{-\frac{Q}{kT}}$   
原子数讨论: 当点缺陷浓度较小时,  $S$  显著增加:  $\Delta A = \Delta U - T \Delta S \rightarrow \Delta A \downarrow$ 

1) 平衡浓度的点缺陷使体积能垒最低 (热力学稳定的缺陷)

2)  $c_e$  与  $T$  成指数关系,  $T \uparrow \rightarrow c_e \uparrow$ 3)  $c_e \propto \sqrt{u}$ ,  $u \uparrow \rightarrow c_e \uparrow$ 
 $c_e \uparrow \rightarrow \Delta A \downarrow$ 

4) 同条件下:

三. 过剩点缺陷: 淬火, 辐照, 冷加工.

四. 点缺陷的运动: 1. 空位的迁移

2. 间隙原子的迁移

3. 空位盘的形核



五、点缺陷与材料作用：扩散影响、性能影响（电阻率↑、密度↓、强度↑、脆性↑增大）

## §3-2 位错的基本概念

### 一、位错概念的产生

1. 理论剪切强度与实际剪切强度的强烈对比
2. 位置理论的证明产生位错的可能性

### 二、位错的基本类型

位错——晶体中线形区域内排列错位的原子组态。

1. ~~刃型位错~~——晶体中半原子面所引起的排列错位的原子组态。

△  
└ 正刃      └ 负刃

2. 螺型位错：晶体中螺旋原子面所引起的排列错位的原子组态。

△  
左螺型    右螺型

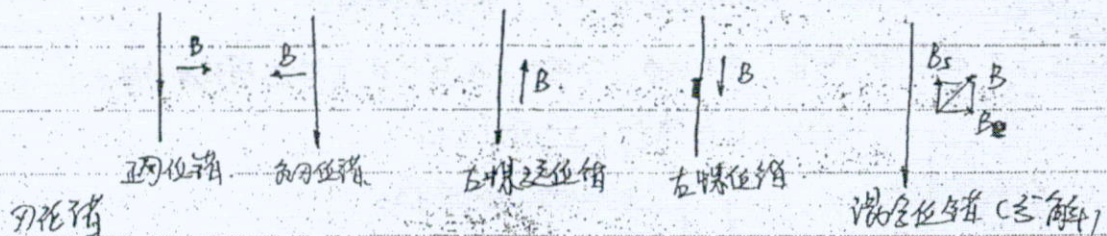
3. 混合位错——晶体中由半原子面和螺旋原子面共同引起的排列错位的原子组态。

### 三相回路及位错中的柏氏矢量

柏氏矢量——表征位错中原子相对位移方向以及位移总量大小的特征参量

1. 柏氏回路求柏氏矢量

2. 柏氏矢量：



- 右手定则：
1. 半原子面在哪（拇指指向）
  2. 位错线的方向（食指）
  3. 柏氏矢量的方向（中指）
- 螺型位错：左不相交，右相同。

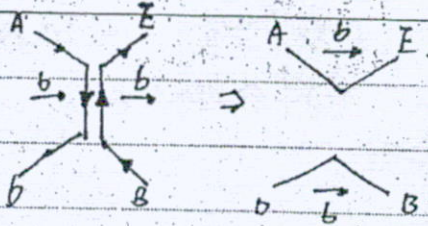


## 3. 柏氏矢量的特性.

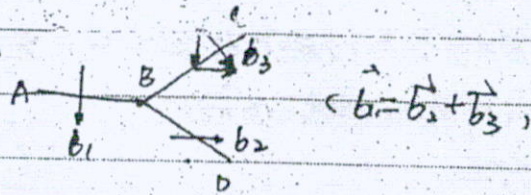
① 唯一性.

② 加和性.

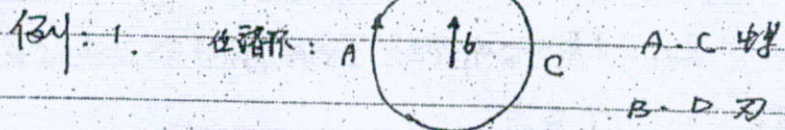
③ 守恒性.



(中间部分相抵消, 相继)



$$\vec{b} = \vec{b}_1 + \vec{b}_2$$



在一个平面内的位错环里

2. ① 它不可以全部为螺位错 (X) V

② — — — — — (V) X

③ 它可以全部为混合位错 (V) X

## 1. 位错的运动

1. 运动的方向: (右手定则), 对刃位错适用.

拇指: 随滑移面一起运动的那部分晶体.

食指: 指向位错线正方向.

中指: 位错线运动方向 (位错的滑移方向).

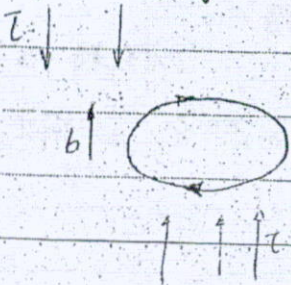
判断螺位错运动方向

右手手指握拳

四指下, 大拇指上

2. 位错的滑移: 在切应力的作用下, 位错线在位错的滑移面内运动.

滑移面: 位错线所在所确定的面.



## 3. 位错的攀移运动.

正应力. 半原子面扩大或缩小所引起的位错运动 (只有刃位错可以攀移).

正攀移: 半原子面缩小的攀移 (斥力 - 即上滑).

负攀移: 半原子面扩大的攀移 (引力).



滑移是保守移动 (即体积不变), 而攀移是非保守移动 (即体积变大或减小)

4. 位错的交滑移: 位错在滑移面内滑移时, 如果是刃型滑移, 则会在另一个滑移面内滑移, 此滑移面与原来那个面垂直, 且交线与位错线平行。

不可以多位错 (因为其只有一个滑移面)

只有多位错才可以交滑移

## 五. 位错的应力场

### 1. 应力和应变方向

假设①线性弹性:  $\sigma = G \gamma$

②各向同性:  $G, \nu$

③连续

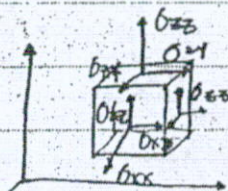
### 1) 应力张量

张量: 力的作用面, 大小, 方向

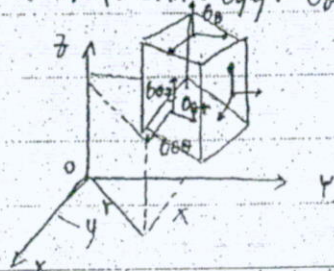
单元立方体:  $\rightarrow \sigma_{xx}$  如:  $\sigma_{xx}$  在  $x$  面上

力的作用面  $\uparrow \uparrow$  力的方向

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$



其中:  $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$  为压应力, 且  $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}, \sigma_{xz} = \sigma_{zx}, \sigma_{yz} = \sigma_{zy}$





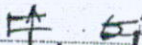
## (2) 应变能量

## 2. 螺位错的应力场

## 3. 刃位错的应力场


4. 特点: (1) 螺位错应力场只有 $\tau_{\theta\phi}$ 应力, 没有 $\sigma_r$ 应力。  
刃位错应力场既有 $\sigma_r$ 应力, 又有 $\tau_{\theta\phi}$ 应力。

(2) 应力场与 $b$ 有关, 位错线位于 $z$ 轴。

(3) 螺位错应力场, 呈向对称。 

(4)  $\uparrow$   $G \times b$ , 不适用于核心区。

(5) 螺: 位错线位于 $z$ 轴, 右螺, 对左螺 $\rightarrow b$ 。  
刃: 半原子面垂直 $x$ 轴, 且在 $y > 0$ 的一方。

(6) 刃位错的应力场分布的特点 

## 5. 位错的应变能:

由于晶格畸变, 使得晶体中, 能量升高的状态就叫做 位错的应变能。

1. 螺位错的应变能  $U_s$ 

$$W = W_e + W_o \text{ --- 中、小。}$$

(忽略掉)

$$U_s = \int_{r_0}^R \int_0^{2\pi} \frac{Gb^2}{4\pi r} dr \cdot d\theta = \frac{Gb^2}{4\pi} \ln \frac{R}{r_0}$$

$r_0$  --- 核心区半径

$R$  --- 应力场作用半径。

## 2. 刃位错的应变能

$$U_e = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{R}{r_0}$$

$$U = \alpha Gb^2$$

$$\text{螺} \quad \alpha = 0.5$$

$$\text{刃} \quad \alpha = 1.0$$

3. 特点 (1) 相互关系,  $b \uparrow \rightarrow U \uparrow$ 。

(2)  $U_e > U_s$ ,  $U_e$  以  $1.5 U_s$ 。

(3) 位错是热力学上不稳定的缺陷。

(4) 混合位错的应变能



## 七. 作用在位错上的力

### 1. 外加应力对位错的作用力

直刃原理

作用在单位长度位错线上的力  $f$

$$\tau L b = f L s \Rightarrow f = \tau b$$

注意: (1)  $\tau$  的作用面: 滑移 → 平行位错的滑移面.  
攀移 → 平行于棱面.

$\tau$  的方向 115

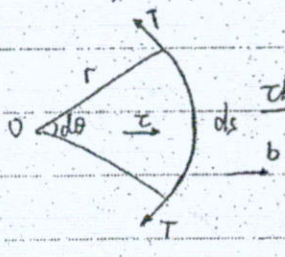
(2) 对螺刃、混合位错, 公式  $f = \tau b$  均适用

(3) 力的方向: 位错运动的方向

### 2. 位错的线张力 $T$ : 使位错线有变短, 由长变短, 由曲变直之力

用单位长度位错线的能量度量

例: 两线  $T$  扎在位错线, 由平直外加应力  $\tau$  之间的关系



$$\begin{aligned} ds \cdot \tau \cdot b &= T \sin \frac{d\theta}{2} \\ &= 2T \frac{d\theta}{2} = r d\theta \cdot \tau b \\ \Rightarrow T &= \tau b r \\ \frac{1}{2} G b^2 &= \tau b r \Rightarrow \tau = \frac{G b}{2r} \end{aligned}$$

### 3. 位错之间的作用力

(1) 平行的两螺位错

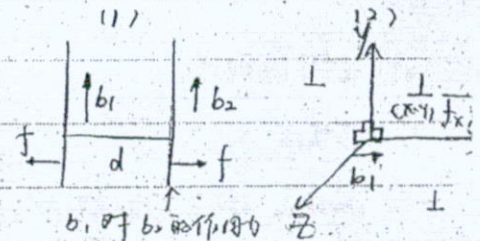
$$f = \frac{G b_1 b_2}{2\pi d}$$

方向: 同号相斥, 异号相吸

(2) 两平行的刃位错

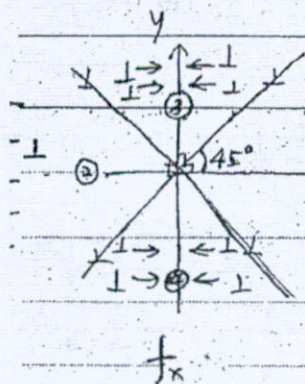
① 同号  $f_x = \sigma_y \times b_z = \frac{G b_1}{2\pi(1-\nu)} \cdot \frac{\pi(x^2+y^2)}{(x^2+y^2)^{3/2}} \cdot b_2$

$f_y = -\sigma_x \times b_z = \frac{G b_1}{2\pi(1-\nu)} \cdot \frac{y(x^2+y^2)}{(x^2+y^2)^{3/2}} \cdot b_2$



$$f_d = \frac{G b_1 b_2}{2\pi(1-\nu)d}$$





讨论: (a) ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩ ⑪ ⑫ ⑬ ⑭ ⑮ ⑯ ⑰ ⑱ ⑲ ⑳ ㉑ ㉒ ㉓ ㉔ ㉕ ㉖ ㉗ ㉘ ㉙ ㉚ ㉛ ㉜ ㉝ ㉞ ㉟ ㊱ ㊲ ㊳ ㊴ ㊵ ㊶ ㊷ ㊸ ㊹ ㊺ ㊻ ㊼ ㊽ ㊾ ㊿

讨论: (a)

讨论: (b)

讨论: (c)

讨论: (d)

讨论: (e)

讨论: (f)

讨论: (g)

讨论: (h)

讨论: (i)

讨论: (j)

讨论: (k)

讨论: (l)

讨论: (m)

讨论: (n)

讨论: (o)

讨论: (p)

讨论: (q)

讨论: (r)

讨论: (s)

讨论: (t)

讨论: (u)

讨论: (v)

讨论: (w)

讨论: (x)

讨论: (y)

讨论: (z)

讨论: (A)

讨论: (B)

讨论: (C)

讨论: (D)

讨论: (E)

讨论: (F)

讨论: (G)

讨论: (H)

讨论: (I)

讨论: (J)

讨论: (K)

讨论: (L)

讨论: (M)

讨论: (N)

讨论: (O)

讨论: (P)

讨论: (Q)

讨论: (R)

讨论: (S)

讨论: (T)

讨论: (U)

讨论: (V)

讨论: (W)

讨论: (X)

讨论: (Y)

讨论: (Z)

1) 两平行的刃位错  $\Delta$  螺位错  $\rightarrow$  无作用力

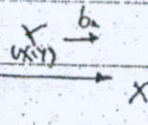
4) [不要记错] Recl-Koehler 公式

$$\vec{F} = \vec{\sigma} \cdot \vec{b} \times d\vec{l}$$

1:  $b$  为  $b_2$ ,  $\vec{\sigma}$  里的  $b$  为  $b_1$ ,  $d\vec{l}$  位错线

$\vec{\sigma} \cdot \vec{b}$  作用力并矢

位错线



$$\text{例: } b_1 \text{ 沿 } x \text{ 轴} \rightarrow \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ dl \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \sigma_{xx} b_2 \\ \sigma_{yx} b_2 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ dl \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \sigma_{xx} b_2 & \sigma_{yx} b_2 & 0 \\ 0 & 0 & dl \end{vmatrix} = \sigma_{yx} b_2 dl i - \sigma_{xx} b_2 dl j$$

$$= \frac{Gb_1}{2\pi(1-\nu)} \frac{1}{d} dl i$$

1) 位错的观察

1. 蚀坑法

蚀坑法: 位错在晶体表面露头, 通过腐蚀使位错露头



中间点为位错的位置所在

2. 透射电子显微镜法



## 九. 位错的长度

1. 线密度: 单位体积晶体中所含位错线的总长度.  $\rho = \frac{L}{V}$ 2. 面密度: 穿过晶面单位面积位错根数.  $\rho_s = \frac{L}{S}$  ( $L$  为总位错根数)  $\rho_v > \rho_s$ 

溶质原子与位错交互作用后, 在位错周围聚集, 现象称为气团

位错与点缺陷: Cottrell 气团

螺——— Shocke 气团 (在 BCC 中有, 在 FCC 中无, 因为 FCC 的位错面是不对称)

空位与位错交互: 攀移

## 3. 位错反应:

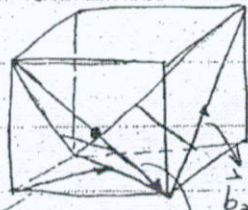
① 反应条件: ① 几何条件  $\sum \vec{b}_i = \sum \vec{b}_f$ ② 能量条件:  $\sum b_i^2 \geq \sum b_f^2$ 

## ② 位错的分解:

## ③ 位错的合并:

扩展位错: 一对不全位错在中间夹一层错

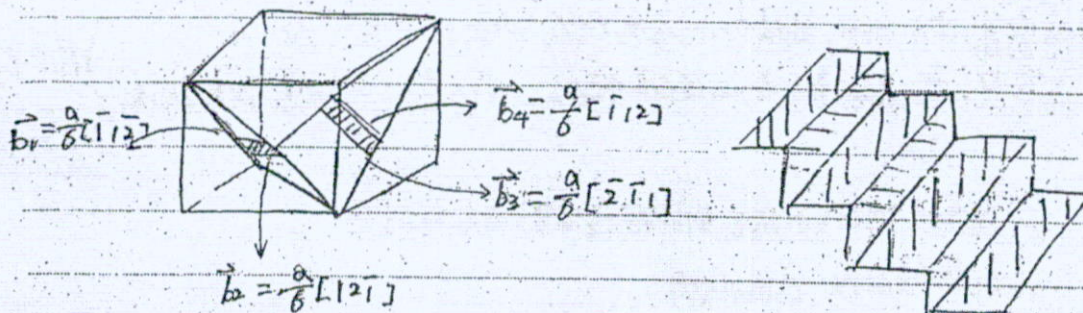
特例: 1. 固定位错


 $\vec{b}_1 = \frac{a}{2} [1 \ 1 \ 0]$ 
 $\vec{b}_2 = \frac{a}{2} [1 \ 0 \ 0]$ 
 $\vec{b}_3 = \frac{a}{2} [1 \ 1 \ 0]$  单位位错合并

 $\vec{b}_1 + \vec{b}_2 = \vec{b}_3 = \frac{a}{2} [1 \ 1 \ 0]$  滑移面 (001), 但其不是 FCC 的滑移面. 所以称为固定位错

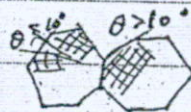


## 2. 位错



不全位错:  $\vec{b}_2 + \vec{b}_3 = \frac{a}{8} [121] + \frac{a}{8} [211] \rightarrow \frac{a}{8} [110]$  — 固定位错不能移动  
 $\vec{b}_1 + \text{层错} + \text{固定位错} + \text{层错} + \vec{b}_4$  叫面角位错 (L-并位错)  
 $(\frac{a}{8} [110])$

## §.3-3 晶体中的面缺陷



## 一. 晶界、亚晶界及其晶界面能

晶界: 同一个相中, 两个相邻晶粒间的界面。位相差  $\theta > 10^\circ$

亚晶界: 一个晶粒中相邻的两个区域存在微小位相差的界面。  $0 < \theta < 10^\circ$

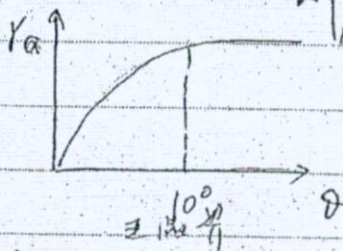
## 1. 亚晶界的结构:

由位错构成。对称倾斜晶界 — 螺位错

## 2. 晶界的构造:

$\theta > 10^\circ$ , 2-5个原子间距厚度, 内原子不规则排列

3. 界面能: 与  $\theta$  有关:  $\gamma_G = \frac{C \cos \theta}{4 \pi (1-\nu)}$  (CB — 常数)  
 晶界:  $\gamma_G = 1 \text{ J/m}^2$



## 二. 表面表面能

## 1. 表面结构的特征:

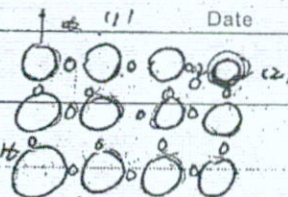


(1) 存在范德华力

吸引力

(2) 存在氢键

电偶极矩



2. 表面能

$$\gamma_s = \frac{1}{2} \epsilon$$

$$\gamma_s \approx 0.05 E_b$$

3. 表面能对材料性能的影响

(1) 纳米粉: 性能变化 熔点 ↓

(2) 粉末烧结:  $\bigcirc \bigcirc \rightarrow \infty \rightarrow \bigcirc$  因为表面 ↓ 所以自发进行, 但需一定外部的条件

4. 晶体的表面形貌: 表面吸附和再吸附

三. 表面 — 单晶表面, 多晶表面, 晶界

1. 表面吸附: 物理吸附, 化学吸附

(1) 物理吸附: 由范德华力所致, 无选择性

(2) 化学吸附: 由化学键力所致, 有选择性

(3) 吸附现象的应用:

① 净化和分离: 活性炭, 硅胶

② 催化作用: 触媒 — 人造金属

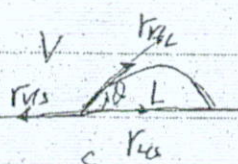
③ 有害: 粉末

2. 晶界为吸附: 有利: B

有害: P, Sb, Sn 偏聚在晶界, 增加脆性

四. 润湿作用

1. 表面张力与润湿性



$$\gamma_{SL} = \gamma_L \cos \theta + \gamma_s$$

$\theta > 0^\circ$  完全润湿

$\theta > 180^\circ$  完全不润湿

$\theta < 90^\circ$  润湿

$\theta > 90^\circ$  不润湿



## 2. 润湿行为对晶体中显微组织的影响

$$\gamma_{\alpha/\alpha} = \alpha \cdot \gamma_{\alpha/\alpha} \cos \frac{\theta}{2}$$

$$\gamma_{\alpha/\alpha} = 2 \cdot \gamma_{\alpha/\alpha}$$

$$\gamma_{\alpha/\alpha} < 2 \gamma_{\alpha/\alpha}$$

 $\theta = 0^\circ$  形成薄膜

 $\theta \neq 0^\circ$  形成引出的薄膜 薄膜: Bi, Cu

球形: 强度提高, Pb

薄膜状的脆性相: 脆性增加

二次硬化



## 3. 在合金中的应用

1) 铸钢: 钢度与炉渣 润湿不好

--- 与炉渣 润湿不好

--- 与钨模 --- 适中

2, 钎焊

润湿好

3, 粉末冶金烧结

润湿好

4, 孕育处理 (形成大量细小的晶核)

润湿好

## 五. 界面能与组织的关系

## 1. 晶粒的形状和大小

1) 晶粒的稳定形状: 三叉晶界 (正三角形晶体)

$$\frac{r_1}{\sin \theta_1} = \frac{r_2}{\sin \theta_2} = \frac{r_3}{\sin \theta_3} \Rightarrow \theta = 120^\circ$$

2) 变化: 1) 小晶粒



外突

小变得更小 → 快

大晶粒: 长大过程

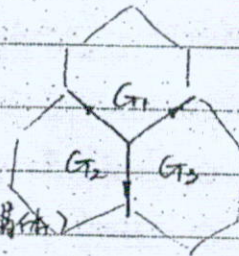
内凹

大变得更慢

## 2. 相界面能与第二相形状和大小

形状: 条状 → 球状 (如: T8 钢 球化退火)

大小: 小 → 大





## 第四章：材料中的相结构及相图

## §4.1 材料中的相结构

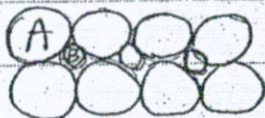
材料中结构、形状、性能、数量相同，并与其他相分开的连续变化的部分。

相结构 { 固溶体：以金属-金属为溶剂，其他元素为溶质，所形成与溶剂有相同晶体结构的物质。  
化合物：晶体结构有变化的固相。

一、固溶体：| 间隙固溶体：溶质原子进入溶剂晶格的间隙中形成的固溶体。  
| 置换固溶体：... 某些原子置换溶剂原子形成的固溶体。

1. 间隙固溶体 — 有限固溶体

(1) 定义：



(2) 晶体结构：固溶体溶剂

(3) 溶质原子的位置：fcc 正四面体

bcc 八面体

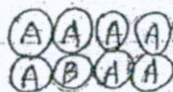
(4) 影响固溶度的因素：① 固溶度  $< 1$  (溶质原子个数/溶剂原子+溶质原子)

② 原子半径差： $\Delta r = \frac{r_A - r_B}{r_A}$   $\Delta r \uparrow$  固溶度  $\downarrow$

③ 间隙形状和大小：

## 2. 置换

(1) 定义：



(2) 结构：固溶体溶剂

(3) 固溶度：{ 有限固溶体  
无限固溶体

1. 结构相似  $\rightarrow$  固溶度  $\uparrow$

2. 电负性差小  $\rightarrow$  固溶度  $\uparrow$

3. 原子半径差小  $\rightarrow$  固溶度  $\uparrow$

4. 电子浓度： $\rho_A = V_A(1-x) + V_Bx$

溶剂原子  $\rightarrow$  溶质原子



高价原子溶解在一价溶剂中  $\% \approx 1.4$

(三) 固体中原子或离子的偏聚与有序

1) 微观不稳定性 / 有序  
 原子间结合能  $E_{AB} = \frac{1}{2}(E_{AA} + E_{BB})$  有序  
 $<$  有序  
 $>$  偏聚

2) 有序固体

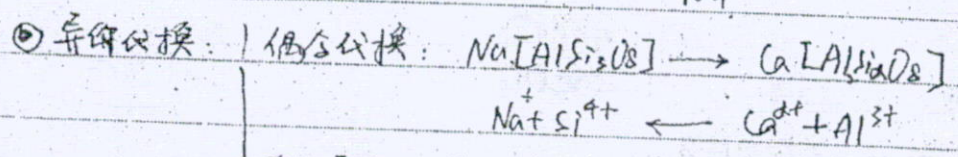
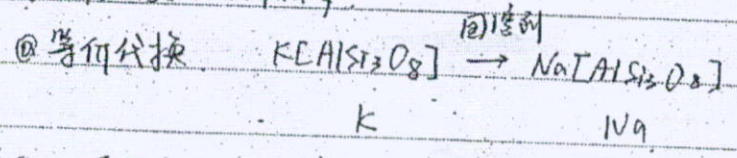
形成条件: 能量条件  
 成键条件: 一定条件  
 温度

Cu - 51 wt% Au  $> 370^\circ\text{C}$  无序固体  
 $< 370^\circ\text{C}$   $\text{Cu}_2\text{Au}$

4) 陶瓷中的固体

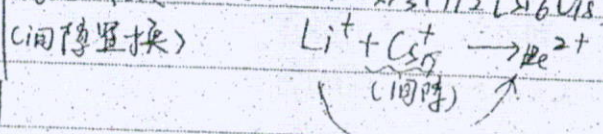
电中性要求 (因为陶瓷是电中性)

1) 代换前正负电价相等



附加阳离子代换: 氟萤石中  $\text{Y}^{3+} + \text{F}^- \rightarrow \text{Ca}^{2+}$

混合代换:  $(\text{Be}, \text{Li}, \text{Ca})_2\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$



对角线规则



(c) 形成点缺陷 | 离子间数量不等或代换  
| 离子电价改变

(2) 代换方向: 使价电子降 | 高价离子代换低价离子  
| 小价离子代换大离子  
有序代换需设电荷↓

二 中间相: 电子化合物

电子化合物: 价电子数符合某些特定值的化合物

尺寸因素化合物 { 间隙固溶体:  $r_A/r_B < 0.59$   
| 间隙化合物:  $r_A/r_B > 0.59$

1. 正价化合物

(1) 形成条件: 电负性差大, 且符合化合价规律

(2) 分子式:  $AB, AB_2, A_2B, M_2O_3$

(3) 晶体结构:

$AB$ 型:  $AgCl$ 型,  $ZnS$ 型,  $MgSe$ ,  $CuSe$ ,  $ZnS$ ,  $AlN$

$AB_2$ 型:  $CaF_2$ 型,  $Al_2Hf$

$A_2B$ 型: 反 $CaF_2$ 型,  $Mg_2Si$

$M_2O_3$ 型:  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$

A) 结合键: | 电负性大: 以共价键为主  
| 电负性小: 以离子键为主  
电负性小: 金属键为主

2 电子化合物 以价电子数不同而区分

(1) 条件:  $e/a$  为特定值

(2) 结构	$\frac{21}{13}$ E相	$\frac{21}{13}$ F相	$\frac{21}{14}$ B相
排列方式	有序排列	有序排列	BCC, HCP, CPH
例子	$MgZn$	$Cu_{15}Zn_8$	$CuZn, Ag_{15}Al$

B+3



13. 合金键, 以金属键为主.

3. 尺寸同量化合物 ( $A-x$ ,  $B-x$ ):

1) 间隙相  $\frac{r_B}{r_A} \leq 0.59$

AB型:  $AB_3$ 型:  $A_2B$ 型:  $A_4B$ 型  
VC TiH W<sub>2</sub>C FeN

结构较简单.

2)  $\frac{r_B}{r_A} > 0.59$  间隙化合物:  $Fe_3C$   $Cr_7C_3$   $Cr_{23}C_6$ ...

结构复杂

3) 拉弗斯相. ①种:  $MgCu_2$   $MgZn$   $MgNi$

$AB_2$  密堆原子结构: 12, 14, 15, 16, ...

### 三. 固体与中间相的比较

	固体	中间相
在相图上的	两端	中部
结构	与相邻相同	全都有
成份	在一定范围内连续	固定
	无限	或在一定范围内连续
原子分布	无序或偏聚	有规则
性能	较软或较脆	硬而脆
	塑性较差	

3.4.2. 二元相图及其类型 类型, 相数

相图: 平衡描述系统中相的状态与温度, 成份, 压力之间关系的图解



# 一. 相同的基本知识

1. 组元: 构成相的最基本的独立物质

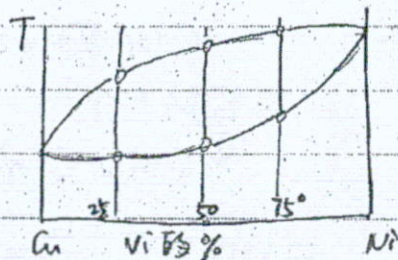
2. 相图的建立

(1) 曲线合金

(2) 冷却曲线 (缓慢冷却)

(3) 求临界点

(4) 描图



3. 相律 — P, 外界压力和化学势

影响的平衡系统中的自由度。组元

由 C, 平衡相的相数 P 符合公式:  $f = C - P + 2$

自由度: 不改变系统状态, 平衡的独立可变因素数目

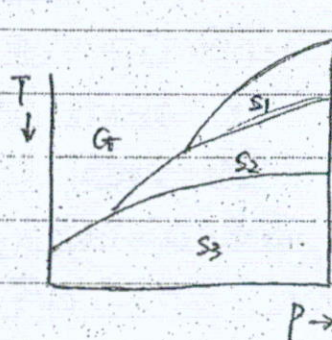
## 二. 一元系相图

$$f = 1 - P + 2 = 3 - P$$

单相平衡  $f = 2$  线上

二相  $f = 1$  线上

三相  $f = 0$  点



## 三. 二元系相图

匀晶, 共晶, 包析, 包晶, 合晶, 熔晶, 偏晶

(一) 二元匀晶相图 (以 Cu-Ni 为例)

1. 相同分析:

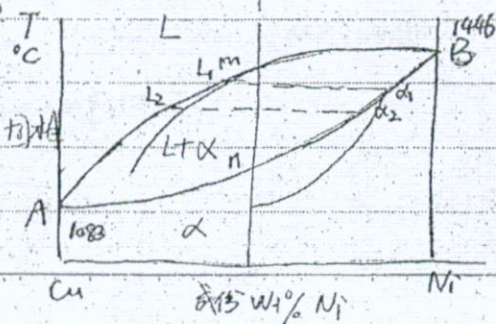
匀晶转变: 从液相中直接结晶出一个固相

点: A, B — 纯 Cu, Ni 的熔点

线: A-B — 液相线

— 固相线

区: 三 T





### 12. 平衡结晶过程分析

(1) 杠杆定理: 已知  $X_L$ ,  $X_0$ ,  $X_H$

液相质量分数为  $W_L$ ?

固相质量分数为  $W_H$ ?

3) 杠杆:  $W_L + W_H = 1$

$$X_L \cdot W_L + X_H \cdot W_H = X_0$$

$$\Rightarrow W_L = \frac{X_H - X_0}{X_H - X_L} \times 100\%$$

$$W_H = \frac{X_0 - X_L}{X_H - X_L} \times 100\%$$

### 4. 不平衡结晶

① 特点: (a) 冷却速度快

(b) 开始结晶温度低于液相线的温度

(c) 液相中的成分: 固相中的成分都不均匀

先结晶的固相含高熔点组分, 后结晶固相含低熔点组分

固相的成分连续偏离液相线

(d) 结晶终止温度低于固相线

(e) 不能使用固相线

### ② 晶内偏析及析出物

晶内偏析: 晶粒内部成分不均匀的现象

枝晶偏析: 枝干含高熔点组分

晶间含低熔点组分

枝晶偏析的倾向取决于  $L/H$  之间的垂直距离

程度取决于  $L/H$  之间的水平距离

组织组成物: 显微组织中能清晰分辨的组成部分



共晶反应: 由某一成分下两相在恒温下同时结晶为两个成分不同固相的反应。

No. 材料15

Date

## 2. 平衡相图

### (1) 相图分析

单相:  $\alpha$  - 置换固溶体

$\beta$  - 置换固溶体

L - 液相

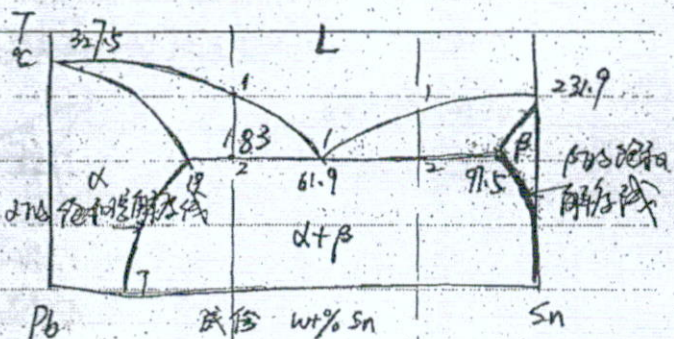
二相:  $L + \alpha$  - 匀晶

$L + \beta$  - 匀晶

$\alpha + \beta$  - 二次析出

三相:  $L + \alpha + \beta$

共晶反应线



相图分析: 单相区、二相区、三相区

自由度:  $f = 2 - 3 + 1 = 0$

$$L_{61.9} \rightarrow \alpha_{19} + \beta_{97.5}$$

### (2) 平衡结晶过程分析

共晶合金 61.9  $L \rightarrow (\alpha + \beta)$  共晶体

1. 直接析出  $\beta$  相, 如析出  $\alpha$  相, 所以析不出来  
2. 也是共晶反应

室温相:  $\alpha + \beta$  (两相)

组织:  $(\alpha + \beta)$  共晶组织

亚共晶合金 (19-61.9 之间的合金)

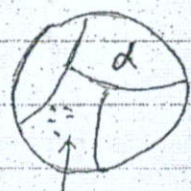
过共晶合金 (61.9-97.5 之间的合金)

固溶体合金

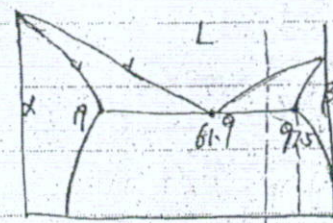
二次析出转变  $\alpha \rightarrow \beta$

相:  $\alpha + \beta$

组织:  $\alpha + \beta$



例:



$\beta + (\alpha + \beta) + \alpha$

室温: 相

$\alpha + \beta$

组织:  $\alpha + \beta$

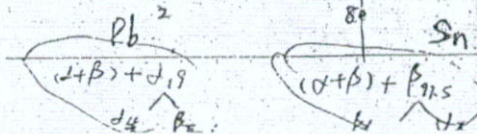
$$W_{\beta} = \frac{80 - 61.9}{97.5 - 61.9} \times \frac{97.5 - 2}{100 - 97.5} \times 100\%$$

$$W_{(\alpha + \beta)} = \frac{97.5 - 80}{97.5 - 61.9} \times 100\%$$

$$W_{\alpha} = 1 - W_{\beta} - W_{(\alpha + \beta)}$$

$$W_{\alpha} = \frac{100 - 80}{100} \times \frac{80 - 61.9}{97.5 - 61.9} \times \frac{100 - 97.5}{100 - 2}$$

$$W_{\beta} = 1 - W_{\alpha}$$





No.

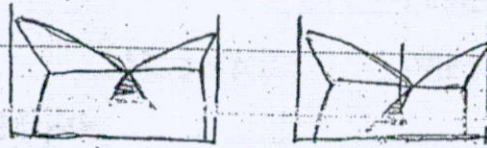
Date

(3) 不平衡结晶及其组织

① 伪共晶 (冷却速度越快, 结晶温度越低, 成分越宽)

② 不平衡共晶

③ 偏晶共晶



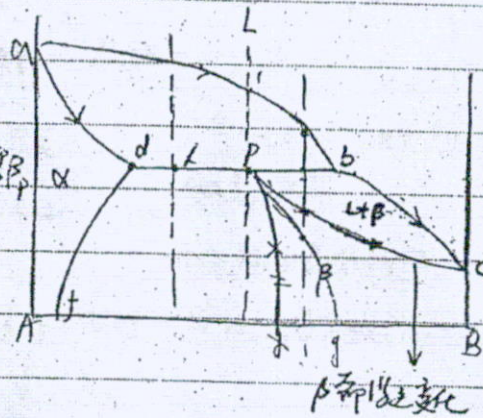
共晶点偏向于低熔点一方  
伪共晶也偏向于低熔点一方

3. 包晶相图 (包晶)

1) 相图分析

E: 三相线:  $\alpha + \beta$  线, 包晶反应线,  $L + \alpha \rightarrow \beta$ 线: L 相线:  $\alpha + \beta$ S 相线:  $\alpha + \beta$ P:  $\alpha + \beta$  一同生长点:  $\alpha + \beta$  一点

P 点: 包晶点



(2) 平衡结晶过程分析

P 点合金  $\beta + \alpha$  (相图) =  $\beta + \alpha$  (组织) (相同)dmp 区间  $\beta + \alpha$  (组织)  $\alpha + \beta \rightarrow \beta + \alpha + \beta + \alpha$  (组织)P-b 区间  $\beta + \alpha$  (组织)  $\beta + \alpha$  $\beta + \alpha$   $\alpha + \beta = \alpha$  $\beta + \alpha = \beta$ 

$$T: W_{\beta} \% = \frac{P-d}{P-d} \times \frac{g-d}{g-f} \times 100\%$$

$$W_{\beta} \% = \frac{P-d}{P-d} \times \frac{d-f}{g-f} \times 100\%$$

$$W_{\beta} \% = \frac{P-d}{P-d} \times \frac{P-f}{g-f} \times 100\%$$

$$W_{\beta} \% = \frac{P-d}{P-d} \times \frac{g-f}{g-f} \times 100\%$$



### 3. 平衡结晶

包晶反应不受合金成分影响

包晶成分的含量

晶内偏析，α相富集

② 不平衡包晶：α+β量 不平衡包晶

内除不平衡组织，退火

### 4. 其他类型的相平衡转变

1. 共析转变 2. 包析 3. 偏晶 4. 熔晶 5. 合晶

#### 5. 小结

分解型	共晶:	$L \xrightarrow{\gamma} \alpha + \beta$	$L \rightarrow \alpha + \beta$
	共析:	$\gamma \xrightarrow{\beta} \alpha + \beta$	$\gamma \rightarrow \alpha + \beta$
	偏晶:	$L_1 \xrightarrow{\beta} L_2 + \alpha$	$L_1 \rightarrow L_2 + \alpha$
	熔晶:	$L \xrightarrow{\beta} \alpha + \beta$	$\beta \rightarrow L + \alpha$
合晶型	包晶:	$\alpha + \beta \xrightarrow{\gamma} L$	$L + \alpha \rightarrow \beta$
	包析:	$\alpha + \beta \xrightarrow{\gamma} \gamma$	$\alpha + \beta \rightarrow \gamma$
	合晶:	$L_1 + L_2 \xrightarrow{\alpha} \alpha$	$L_1 + L_2 \rightarrow \alpha$

#### 形成中间相的相图

### 6. 根据相图定性判断材料的性能

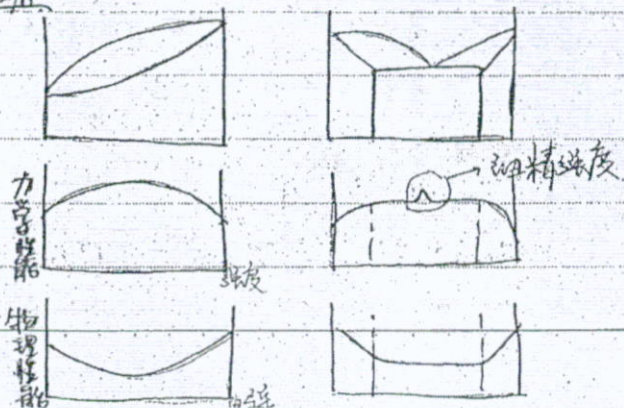
1. 力学和物理性能

2. 工艺性能

1. 铸造性能

流动性

疏松 (含气缩孔, 集中缩孔)





No.

Date.

## 2° 冷压力加工性能

(固溶体, 软而韧 (冷压力加工性能如)  
中间相, 硬而脆

固溶体及固溶体加工至中间相是含

3° 切削 HBS: 170~230

## § 4-3 复杂相图分析

### 一. 分析方法

(1) 有九稳定中间相 (有稳定相可生成两相区)

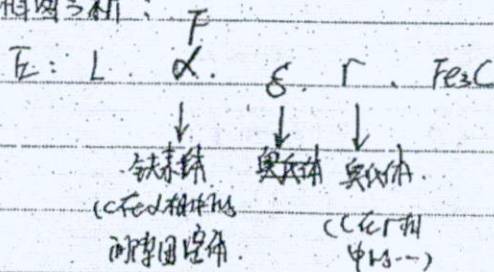
(2) 根据相互接触法则: 相邻相, 相数加1, (点接触除外)

(3) 找水平线 (三相平衡转变)

(4) 分析平衡结晶过程, 要指明组织, 各组织, 产成物的质量分数

### 二. Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图

#### 1. 相图分析:



线: 包晶反应线: HJB (1495°C)  $L + \delta \rightarrow \gamma$

共晶 -- : ECF (1148°C)  $L \rightarrow (\gamma + \text{Fe}_3\text{C})$  共晶体

共析 -- : PSK (727°C)  $\gamma \rightarrow (\alpha + \text{Fe}_3\text{C})$  共析体 (又叫“珠光体”)

#### 2. 平衡结晶过程分析

(1) 分析成分的含量:  $w_c = 0.17\%$

$\left. \begin{array}{l} \alpha + \text{Fe}_3\text{C} \quad (\text{相. 2}) \\ P \quad (\text{组织. 1}) \end{array} \right\}$



No. 材料117

Date

(12) 亚共析 (以 0.4% 为例)

0.0218% ~ 0.77%

$\delta_{0.09} + L_{0.53} \rightarrow F_{0.17} + L_{0.17}$

$F \rightarrow \alpha$      $\alpha_{0.0218} \rightarrow F_{0.17}$   
↓  
P

相:  $\delta + Fe_3C$

组织:  $F + P$  (铁素体 + 珠光体)

$$W_F\% = \frac{0.77 - 0.4}{0.77 - 0.0218} \times 100\%$$

$$W_P\% = 1 - W_F\%$$

(13) 过共析 (W. 1.2% 为例)

0.77 ~ 2.11

相:  $\alpha + Fe_3C$

组织:  $P + Fe_3C_{II}$  (二次渗碳体)

$$W_P\% = \frac{6.69 - 1.2}{6.69 - 0.77} \times 100\%$$

$$W_{Fe_3C}\% = 1 - W_P\%$$

(14) 亚共晶 (4.3%)

连续网状

$L \xrightarrow[4.3]{1148} (L_{0.11} + Fe_3C)$

↓  
 $Fe_3C_{II}$   
↓  
P

高温  
 $L_d \xrightarrow[4.3]{1148} L_d'$

变态莱氏体  $L_d'$   
室温下

相:  $\alpha + Fe_3C$

组织:  $L_d'$

(15) 亚共晶 (W. 3.0% 为例)

2.11 ~ 4.3

$F_{0.11} + L_{4.3}$

↓  
 $Fe_3C_{II}$     ↓  
 $L_d$   
↓  
 $Fe_3C_{II}$     ↓  
P (析析物)

相:  $\alpha + Fe_3C$

组织:  $P + L_d + Fe_3C_{II}$

$$W_{L_d}\% = \frac{3.0 - 2.11}{4.3 - 2.11} \times 100\%$$

$$W_{(P+Fe_3C_{II})}\% = \frac{4.3 - 3.0}{4.3 - 2.11} \times 100\%$$

$$W_P\% = \frac{6.69 - 2.11}{6.69 - 0.77} \times W_{(P+Fe_3C_{II})}\%$$

$$W_{Fe_3C_{II}}\% = 1 - W_P\% - W_{L_d}\%$$



No.

Date

(b). 过共晶.

 $w_c = 5.0\%$  为例:相:  $\alpha + Fe_3C$ 组织:  $Ld + Fe_3C$ 

(c). 工业纯铁 (其包晶反应)

 $w_c < 0.0218\%$ 相:  $\alpha + Fe_3C$ 组织:  $\alpha + Fe_3C$ 

3. 碳含量对铁碳合金平衡组织和性能的影响.

(1) 对组织的影响: 书上图 5-6.2. 5-6.3.

(2) 对力学性能的影响.

a. 工业纯铁: 软而韧. 熟铁b. 白口铁: 2.11~6.69 硬而脆. 生铁

c. 铸钢:

(3) 对压力加工性能的影响.

白口铁: 不能锻造或轧. 不能压力加工成型.

工业纯铁: 冷加工.

熟铁 (低碳: 冷加工.  $C < 0.25\%$ ).

高C: 热加工 (锻造等).

(4) 对铸造性能的影响.

白口铁.

流动性.

 $T_m$ 

S/C 相线的垂直距离 (越大越好).

t. 杂质元素对钢性能的影响.

S, P, Mn, S; O, H, N.

(1) S, P 的影响: 脆性增加.

S: 热脆性

P: 冷脆性



12) Mn Si 的影响:

起固溶强化作用, 脆性↑

使 Mn 减弱脆性

5. 碳素钢的分类 牌号及用途

1) 分类:

(a) 按  $W_c$  分类: 低碳钢 | 中碳钢 | 高碳钢  
0.25 | 0.64

(b) 质量分 (S, P): 普通碳素钢:  $W_s \leq 0.055$   $W_p \leq 0.045$   
优质碳素钢:  $\leq 0.035 \sim 0.040$   $\leq 0.035 \sim 0.040$   
高级碳素钢:  $\leq 0.02 \sim 0.03$   $\leq 0.03 \sim 0.035$

(c) 用途: 碳素结构钢: 甲, 中碳钢  
2 号: 高碳钢

2) 牌号及用途

(a) 普通碳素结构钢:  $Q_{xxx}$  } Q-屈服强度: 即其屈服强度大于 xxx

用途: 构件, 不重要零件

(b) 优质碳素结构钢: 1 号代表其含碳量 (88% (33.3%))

08 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65

用途: 作零件

杆件

渗碳件

轴类

弹簧

(c) 碳素工具钢 (优质): 碳含量 (1.0%~1.3%)

T7 T8 T9 T10 T11 T12 T13 T14

作工具



# §4-4. 相图的热力学基础

## 一. 同构体的自由能—混合曲线

$$G = G_0 + \Delta H_m - T\Delta S$$

$$G_0 = X_A \mu_A^* + X_B \mu_B^*$$

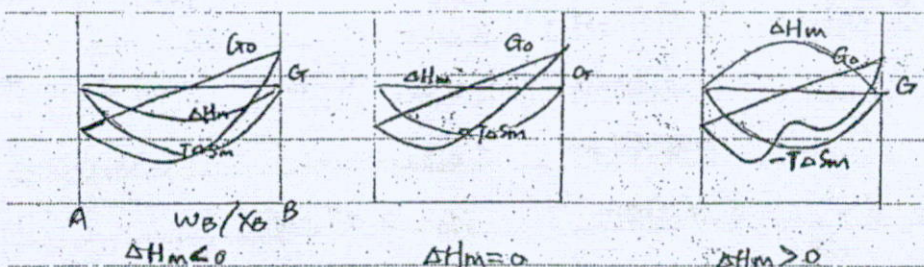
$\Delta H_m$  — 混合热

$T\Delta S$  — 混合熵  $> 0$

对理想固溶体  $\Delta H_m = 0$

对吸热  $\Delta H_m > 0$

$\Delta H_m < 0$



讨论: (1)  $G-X$  形状随  $T$  变化  $T \uparrow$   $G \downarrow$  ( $T \downarrow \rightarrow G \uparrow$ )

(2) S-L 相变  $T \uparrow \rightarrow T \downarrow$  时  $L \uparrow$  加快

(3) 对  $\Delta H_m > 0$



## 二. 克劳修斯—克拉佩龙方程 (一元)

一元相变  $\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta H}{T\Delta V}$

举例: (1)  $f = C - p + 2 = 1 - 2 + 2 = 1$

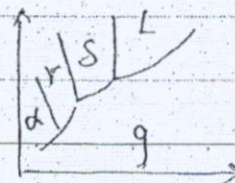
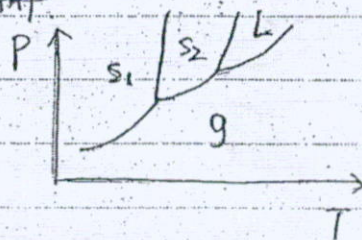
① S/G  $\Delta G$  随  $\frac{dp}{dT}$  较小

S/L  $\Delta G$  随  $\frac{dp}{dT}$  较大

② 金属:  $\frac{dp}{dT} > 0$   $P \downarrow$ ,  $T_m \downarrow$  ( $L \rightarrow S$  体积,  $P$  减小)

冰:  $\Delta G$  随  $\frac{dp}{dT} < 0$   $P \uparrow$ ,  $T_m \downarrow$

③ Fe 同素异构体:  $L \xrightarrow{(L)} S \xrightarrow{(S)} \gamma \xrightarrow{(L)} \alpha$  ( $L$  面,  $\alpha$  心)  
 $\Delta V \downarrow$   $\Delta V \downarrow$   $\Delta V \uparrow$





## 三. 相平衡的条件 (二元)

1. 化学位  $\mu_i^j = \left( \frac{\partial G^j}{\partial X_i} \right)_{T, P, X_{(i \neq i)}} \quad \text{(组分 } i \text{ 在 } j \text{ 相中)}$ 

2. 相图中的相平衡 (自由能相等)

1) 一元的:  $G_L = G_S, \quad \frac{dP}{dT} = \frac{\Delta S}{\Delta V}$ 

(2) 多元相平衡条件 (化学位相等)

$$\mu_i^1 = \mu_i^2 = \mu_i^3 \dots = \mu_i^j$$

13) 二元系的相平衡 (课本)

## 四 根据 G-X 曲线随 T 变化推测相图

1. 匀晶相图 2. 共晶相图 3. 包晶相图

4. 调幅分解

## §4.5 三元相图

一. 成图表示法

1. 等边三角形 重心对称线 } 过一个顶点  
平行于一边

2. 等腰三角形: 一个组分含量很少 另外两个组分含量相当

3. 直角三角形: 一个组分含量多 另外两个组分含量少

## 二. 三元匀晶相图

1. 相图分析: 点:  $T_A, T_B, T_C$ 面: 二个 } 三相相图  
同相面线: 三条 } 三相相图  
三相线

2. 水平截面 (等温截面)

(1) 溶解度线 (2) 连线规则 (3) 连线走向 (4) 相对量计算: 杠杆定律

(5) T-相组成 相平衡线 相对量



## 4.3. 平衡结晶过程分析

## 4. 垂直截面 (垂直截面)

垂直截面的作用: 结晶过程

不平衡结晶过程

不平衡结晶的相对量

## 三. 多相平衡的分析

1. 自由能—成分曲线

2. 两相平衡

3. 三相平衡 (重点为重心法则, 见书 P215)

4. 四相平衡 (四相平衡可能形成四边型, 也可能形成三角形)

5. 相互接触法则: 如果相邻两相相差 1 面接触

2

线接触

3. 点接触

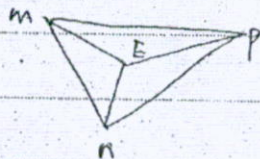
## 四. 液相完全相溶, 固相有限互溶, 具有四相平衡共晶反应三元相图

1. 相图分析 (图 P220 书)

1) 液相面:  $L$  (E)  $GE \pm E \rightarrow L$ 2) 固相转变面 (3 条)  $CKP \pm C$ 

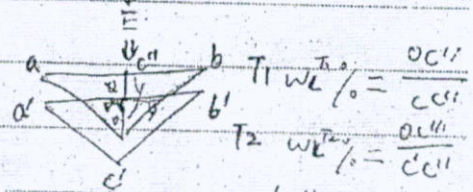
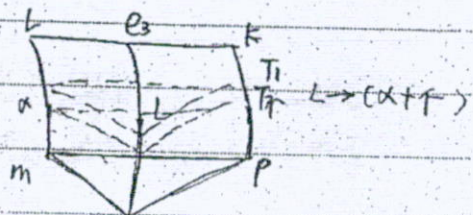
3) 三相平衡共晶转变及其三相平衡横截

4) 四相平衡横截 (1-1)

 $L \rightarrow (\alpha_m + \beta_n + \gamma_p)$ 

四相转变: 三相共晶 (步长为三相共晶)

5) 脱溶转变及其三相平衡横截 (1-1)



$$T_1 \text{ 时 } w_L^{\text{平衡}} = \frac{OC''}{CC''}$$

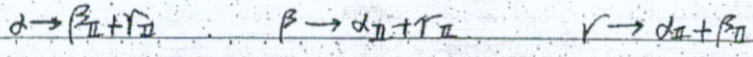
$$T_2 \text{ 时 } w_L^{\text{平衡}} = \frac{OC'''}{CC'''}$$

$$\therefore CC'' = CC'''$$

$$\text{即 } OC'' > OC'''$$

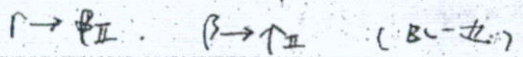
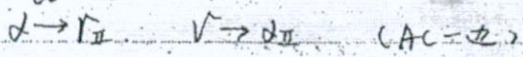
$$\therefore \text{液相成分} \rightarrow \alpha + \gamma$$





(b). 溶解度曲线包围的二相平衡区 (相区=相平衡图上的固溶度线)

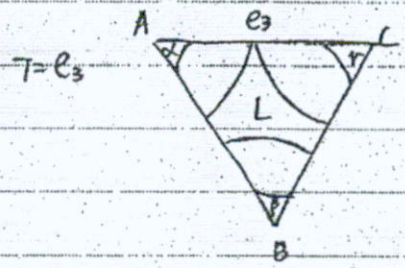
相区:  $\{PKK'P'\}$  (6f)  
 $\{Lmm\}$



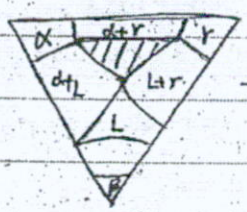
## 2. 水平截面

斜:  $T_m^C > T_m^A > T_m^B$

$e_3 > e_1 > e_2$

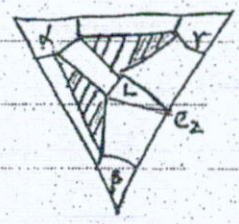


$T = e_1$

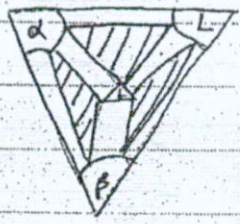


一个三棱柱被截引

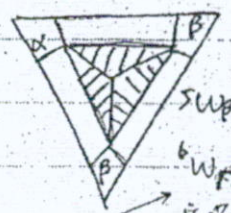
$T = e_2$



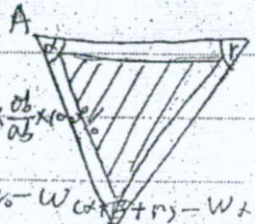
$E < T < e_2$



$T = E$



$T < E$



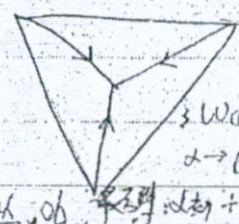
$5W_{\beta_{II}}\% = \frac{ad}{dh} \times \frac{gh}{kf} \times \frac{ob}{ab} \times 100\%$

$6W_{\gamma_{II}}\% = 1 - W_{\alpha_{II}}\% - W_{\beta_{II}}\% - W_{L}\%$

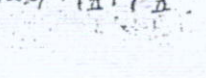
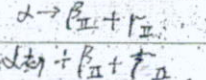
富液相:  $\alpha + \beta + \gamma$

## 3. 投影图

1. 按相图投影图大小和(α+β+γ)及(α+β+γ)投影图

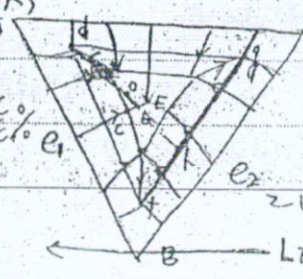


$3W_{\alpha(\beta+\gamma)}\% = \frac{bc}{ec}\% e_1$



富液相

$4W_{L\%} = \frac{ah}{dh} \times \frac{ob}{ab} \times 100\%$

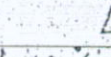


$1. W_{L\%} = \frac{ob}{ab} \times 100\%$

α初+L

L → (α+β)

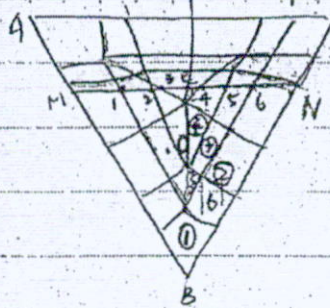
$2. W_{\alpha(\beta+\gamma)}\% = \frac{eb}{ce}$



$L \rightarrow (\alpha + \beta + \gamma)$



## 4. 平衡结晶过程分析



图一

平衡  
只有在四相平衡线以内才会发生四相平衡反应

$$\beta_{初} + (\alpha + \beta) + \alpha + \beta_{终} \quad (组织) \quad 4个$$

在四相平衡时析出  
在三相平衡时析出

$$相 = \alpha + \beta + \gamma \quad (2个)$$

## 5. 按组织分析的全析过程

$$① E: \beta$$

$$② E: \beta_{初} + \beta_{终} + (\beta + \gamma)$$

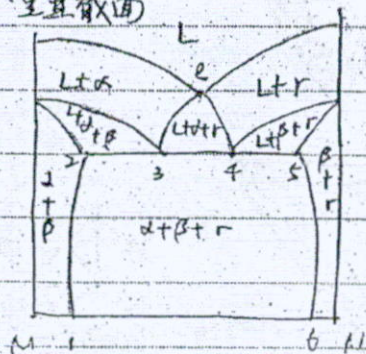
$$③ E: \beta_{初} + (\beta + \gamma) + \beta_{终} + \alpha$$

$$④ E: \beta_{初} + (\beta + \gamma) + (\alpha + \beta + \gamma) + \alpha + \beta_{终}$$

$$⑤ E: \beta_{初} + \alpha + \beta_{终}$$

$$⑥ E: \beta_{初} + \beta_{终}$$

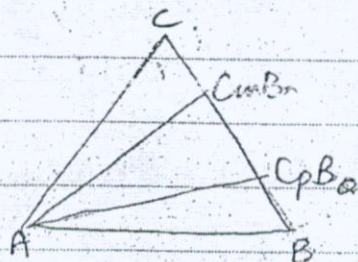
## 6. 垂直截面



图二 → 见图一

用个全析结晶过程

不能知道平衡析出的成分



## 五. 复杂三元相图的分析

看: 1. 有无稳定的化合物(中间相)

2. 根据相接触法则填写相区 (在相图中)

$$\Delta P = 1 \quad \text{面}$$

$$\Delta P = 2 \quad \text{线}$$

$$\Delta P = 3 \quad \text{点}$$

$$\text{平面图中} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta P = 1 \quad \text{线} \\ \Delta P = 2 \quad \text{点} \end{array} \right.$$



## 3. 三相平衡分析

转变类型	共晶型 (1#2)	包晶型
反应式	$L \rightarrow \alpha + \beta$ $V \rightarrow \alpha + \beta$	$L + \alpha \rightarrow \beta$ $\alpha + \beta \rightarrow \gamma$
水平截面图中 共晶三角形内 温度降低时		
反应式	以一点为顶点, 其边为相, 箭头点 向生成相.	以一条边为顶点, 箭头 向生成相.
垂直截面图		
中轴为三角形 的形状	一个顶点向上, 其边为生成相.	以一条边为顶点.
立体图		

## 4. 四相平衡分析

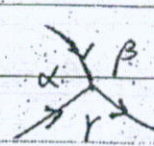
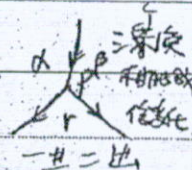
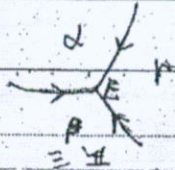
类型	共晶型	包晶型	共晶型
反应式	$L \rightarrow \alpha + \beta + \gamma$ $\delta \rightarrow \alpha + \beta + \gamma$	$L + \alpha + \beta \rightarrow \gamma$ $\alpha + \beta + \gamma \rightarrow \delta$	$L + \alpha \rightarrow \beta + \gamma$ $\alpha + \beta \rightarrow \gamma + \delta$
四相平衡 平衡形状			
四相反应			
四相反应			



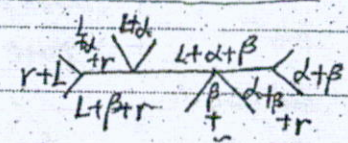
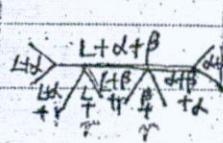
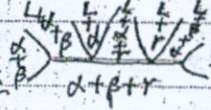
No.

Date

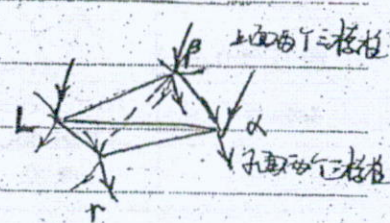
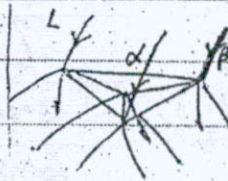
垂直截面极多图中的  
平衡形式



垂直截面图中(四相)  
平衡形式



全图



## 五. 实际三元相图

举例: 见辅导书

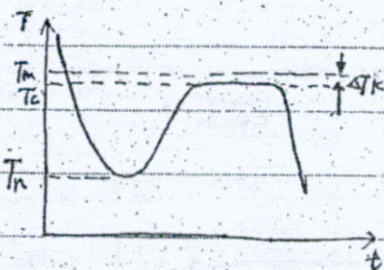
## 第五章. 材料的凝固

### §5-1 凝固的基本规律

一. 液态金属的结构: 长程有序 短程有序

二. 过冷现象

晶核



过冷度:  $\Delta T = T_m - T_n$

$V_L \uparrow \rightarrow \Delta T \uparrow$

$$\Delta G_T = -RT \ln P$$

$T_m$  — 理论结晶温度  $T_L$  — 液固表面温度

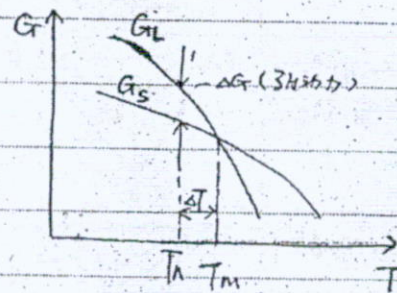
$T_n$  — 实际结晶温度

$\Delta T_K$  — 动态过冷度  $\Delta T_K = T_m - T_L$

### 三. 凝固的热力学条件

1. 凝固的驱动力:  $\Delta G = G_{\text{固}} - G_L < 0$

2. 凝固的必要条件:  $\Delta T > 0$  过冷





## 3. 结晶的驱动力的大小

$$\Delta G_v = \frac{-L_m \Delta T}{T_m}$$

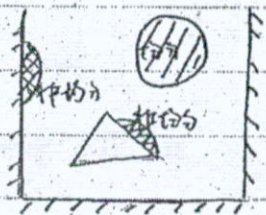
 $L_m$  — 结晶潜热

 $\Delta G_v$  — 单位体积, 由液相  $\rightarrow$  固相  $\Delta G$  的减少值

## 四. 结晶的一般过程

形核及核长大

注: ~~非依附形核~~ 优先在现成的固相基面上表面形核  
~~依附形核~~ 不依赖于现成的固相基面



## 1. 均质形核

1. 晶胚形成时能量变化

\* 注

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

液相自由能      固相自由能      表面能


 $L/S$   
 $\rightarrow$  表面 (可动能个)
2. 临界晶核半径及临界形核功  $\Delta G^*$ 
 $r < r^*$  晶胚: 不能自发长大, 消失 (随  $r$  变大,  $\Delta G$  个, 不能自发形成)

 $r > r^*$  晶胚: 能够自发长大, 晶核 (随  $r$  变大,  $\Delta G$  个)

$$r^* = -\frac{2\sigma}{\Delta G_v} = \frac{2\sigma T_m}{L_m \Delta T} \quad \text{--- (2) 代入 (1)}$$

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\sigma^2}{3(\Delta G_v)^2} = \frac{16\pi\sigma^2 T_m^2}{3(L_m \Delta T)^2} = \frac{1}{3} \sigma A^* \quad \text{--- (3)}$$

讨论: (1) 体积自由能的降低, 补偿表面能的量

(2) 临界形核功等于临界表面能的1/3, 由能量起伏提供

(3) 形核 | 必要条件:  $\Delta T > 0$ 
 充分条件:  $\left\{ \begin{array}{l} \text{结构起伏} \\ \text{能量起伏} \end{array} \right.$ 
2. 形核率:  $I$  — 单位时间单位体积液体中形核的数目 $\Delta$ 

$$I = C_n \frac{dn}{dt}$$

 $C_n$  — 单位体积液体中临界晶核的数

 $\left( \frac{dn}{dt} \right)$  — 单位时间内能够从液体中获得原子而长大的临界晶核的个数

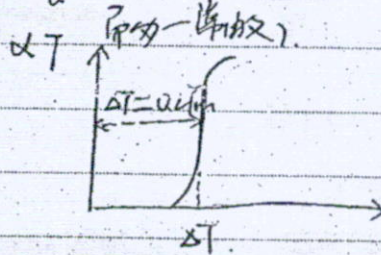
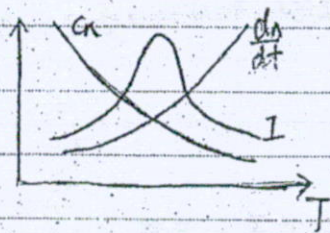


No.

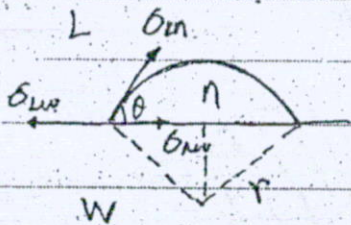
Date

$$I \sim C_n = B \cdot e^{-\frac{\Delta G^\ddagger}{RT}} \propto \frac{1}{\Delta G^\ddagger}$$

$$\frac{dn}{dt} = B_2 e^{-\frac{Q}{RT}} \propto \frac{1}{Q} \quad (Q - \text{扩散激活能, 与 } T \text{ 关系不大})$$



二. 非均匀形核



1. 非均匀形核时能量变化

$$\Delta G_{\text{非}} = V \cdot \Delta G_V + \Delta G_{\text{TS}} \quad (1)$$

体积自由能      表面能增加  
的降低

$$V = \pi r^3 \left( \frac{2-3\cos\theta + \cos^3\theta}{3} \right) \quad (2)$$

$$\Delta G_{\text{TS}} = A_n \cdot \sigma_n + A_{nw} (\sigma_{nw} - \sigma_w) \quad (3)$$

$$A_n = 2\pi r^2 (1 - \cos\theta) \quad (4)$$

$$A_{nw} = \pi r^2 \sin^2\theta = \pi r^2 (1 - \cos^2\theta) \quad (5)$$

$$\sigma_w = \sigma_n + \sigma_n \cos\theta \quad (6)$$

将②→⑥代入③

$$\Delta G_{\text{非}} = \left( \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \Delta G_V + \pi r^2 \cdot \sigma_n \right) \left( \frac{2-3\cos\theta + \cos^3\theta}{4} \right)$$

$$\frac{d(\Delta G_{\text{非}})}{dr} = 0 \Rightarrow r_{\text{非}}^* = -\frac{2\sigma_n}{\Delta G_V} < 0$$

$$\Delta G_{\text{非}}^* = \frac{16\pi\sigma_n^3}{3(\Delta G_V)^2} \left( \frac{2-3\cos\theta + \cos^3\theta}{4} \right)$$

2. 讨论: (1)  $r_{\text{非}}^* = r_{\text{非}}$  但体积不同:  $V_{\text{TS}} > V_{\text{非}}$  球的一部分.

$$(2) \frac{\Delta G_{\text{非}}^*}{\Delta G_{\text{TS}}^*} = \frac{2-3\cos\theta + \cos^3\theta}{4} = f(\theta)$$

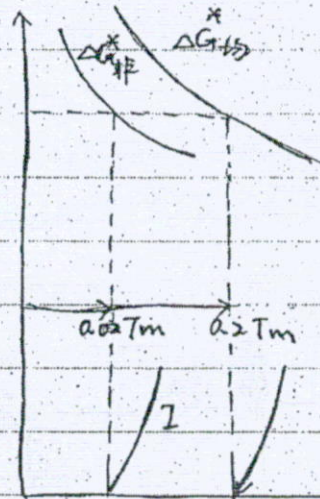
当  $\theta = 0$  时,  $f(0) = 0$  无核长大



$\theta = 0$  时  $f(\theta) = 1$ , 均匀形核

$0 < \theta < \pi$  时  $0 < f(\theta) < 1$ , 非均匀形核

(3) 非均匀形核在相同条件下, 比均匀形核更容易



(4) 应用: 细化晶粒  $\rightarrow$  细晶强化

孕育处理 (加孕育剂——即液体中的现成晶核)  
粗粒: 非均匀形核

### §5-3. 晶核长大

一. 晶核长大的必要条件

$$\Delta T = T_m - T_c > 0$$

熔点  $T_m$   $\rightarrow$  液固界面处的温度

二. 液固界面的微观结构

1. 微观粗糙界面 (宏观光滑但微观粗糙是分子对金属, 金属型的凝固液体, 化合物)



2. 微观光滑界面 (宏观粗糙但微观光滑) 对非金属 亚金属

三. 晶核长大的方式

1. 平面状生长 (垂直界面生长)

面状生长  $\rightarrow$  平面状

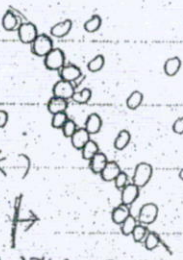
负温度梯度  $\rightarrow$  树枝状生长

生长最快

$$\Delta T = 0.01 \sim 0.05^\circ\text{C}$$



非纯物质, 有得到





2. 台阶式长大 (微观见月界面)

速度最慢

$$\Delta T \approx 1-2^\circ$$

3. 依靠晶体缺陷而长大

S 由表面部

速度较快

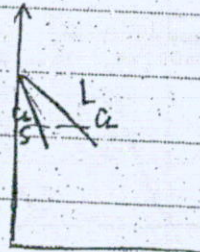
### § 5-4. 固体溶液的凝固

#### 一. 固体溶液的平衡凝固

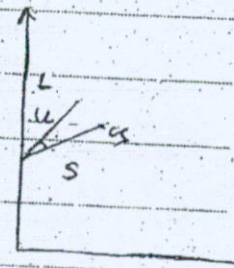
1. 平衡凝固过程  $k_0 = \frac{C_s}{C_L}$

2. 平衡凝固 (凝固相的成分始终不变)

#### 二. 固体溶液的非平衡凝固



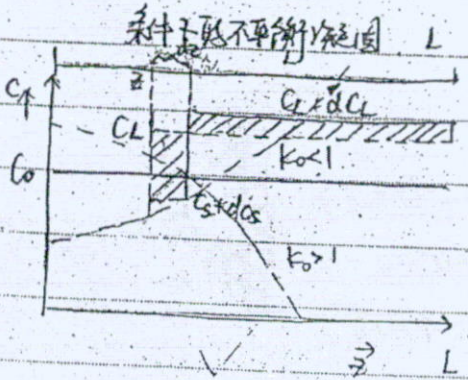
$k_0 < 1$



$k_0 > 1$

固相不扩散 { 液相完全混合 (对流, 扩散, 搅拌)  
液相完全不混合 (扩散)

★ 1. 固相不扩散, 液相完全混合



$$\text{推导: } [C_L - C_S + dC_S](L - (z + dz - z)) = (C_L + dC_L - C_S)(L - (z + dz))$$

$$C_S = C_L k_0$$

$$(1 - k_0) \int_0^z \frac{dz}{L - z} = \int_{C_0}^{C_L} \frac{dC_L}{C_L} \quad (\text{积分时取方即})$$

$$\begin{cases} C_L = C_0 \left(1 - \frac{z}{L}\right)^{k_0-1} & \text{--- (1) 液相成分} \\ C_S = C_0 k_0 \left(1 - \frac{z}{L}\right)^{k_0-1} & \text{--- (2) 固相成分} \end{cases}$$

讨论: (1) 对  $k_0 < 1, k_0 > 1$  都适用

(2) 在  $k_0 < 1$  情况, 左端纯 B, 右端富集 A,  $k_0$  较小, 越靠近左端, 富集 A 越多  
在  $k_0 > 1$  时, 左端富集 A, 右端纯 B,  $k_0$  越大, 越靠近左端, 富集 A 越多



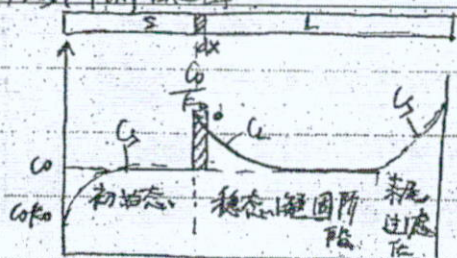
## 2. 固相不扩散, 液相完全不混合条件下平衡凝固

在初始阶段  $C_s < C_0$

在稳态阶段  $(C_L)_s = C_0$

$$(C_L)_c = \frac{C_0}{k_0}$$

$$(C_L)_B = C_0$$



$R$  - 凝固速度:  $\frac{dx}{dt}$

$D$  - 液体中溶质原子扩散系数

$dt$  - 时间

单位长度样品上, 单位时间内通过单位面积的物质质量

$A$  - 截面积为  $A$  的棒的横截面积

$$\text{即 } \frac{(C_L - C_0)RA \cdot dt}{dx \cdot A} = -D \cdot \frac{dC_L}{dx} \cdot A \cdot dt$$

$$\text{整理得: } \frac{dC_L}{C_L - C_0} = -\frac{R}{D} dx \Rightarrow \int_{C_0}^C \frac{dC_L}{C_L - C_0} = \int_0^x -\frac{R}{D} dx$$

$$\Rightarrow C_L = C_0 \left[ 1 + \frac{1 - k_0}{k_0} e^{-\frac{R}{D}x} \right] \text{ 为凝固方程}$$

初始过冷度  $C_s < C_0$

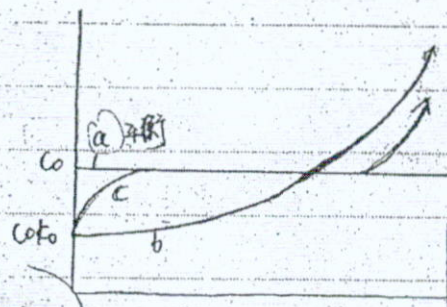
未熔过冷度  $C_s > C_0$

稳态凝固  $C_s = C_0$  其液相的凝固过程

## 三. 凝固与固溶体棒中的宏观偏析

凝固速度:  $a < b < c$

偏析程度:  $b > c > a$



★ 重点

凝固速度与对固溶体棒体长大的影响

a - 平衡凝固

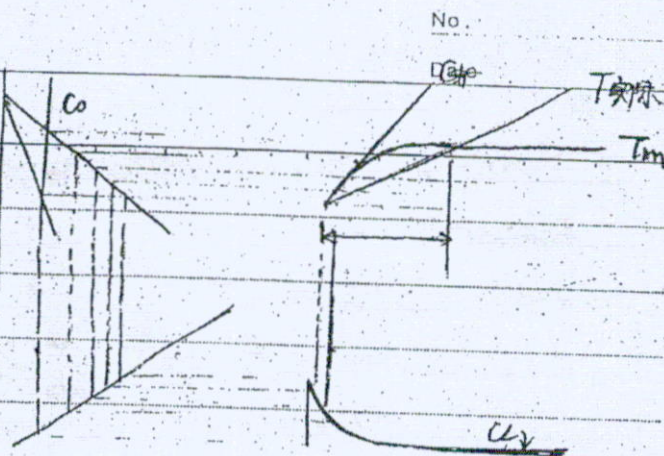
b - 固相不扩散, 液相完全混合

c - 固相不扩散, 液相完全不混合

1. 凝固过冷程度



★ 因液体不平衡引起同时， $\gamma$  曲面  
 前沿的液体中存在溶质原子聚集  
 使液体中的实际温度低于理论凝  
 固温度，即使之部分液体处于  
 过冷状态，这种现象称为成分  
 过冷



2. 成分过冷的条件

$$G = \left. \frac{dT_m}{dx} \right|_{x=0} = \frac{dT_m}{dC} \cdot \left. \frac{dC}{dx} \right|_{x=0} = m \cdot \left( -\frac{RC_0}{D} \right) \cdot \frac{1-k_0}{k_0}$$

由于:  $C = C_0 \left[ 1 + \frac{1-k_0}{k_0} e^{-\frac{R}{D}x} \right] \Rightarrow \left. \frac{dC}{dx} \right|_{x=0} = -\frac{RC_0}{D} \cdot \frac{1-k_0}{k_0}$  (代入)

得临界条件:  $\frac{G}{R} = -\frac{mC_0}{D} \cdot \frac{1-k_0}{k_0}$

讨论: (i) 该条件既适用于  $k_0 < 1$  也适用于  $k_0 > 1$ .

$k_0 < 1$  时  $m < 0$

$k_0 > 1$  时  $m > 0$

(ii) 当  $\frac{G}{R} = -\frac{mC_0}{D} \cdot \frac{1-k_0}{k_0}$  临界状态

当  $\frac{G}{R} < -\frac{mC_0}{D} \cdot \frac{1-k_0}{k_0}$  过冷

> 无过冷

(iii) 影响因素

内因:  $C_0$  成分过冷倾向 (大)

$C_0 \uparrow$   $|m| \uparrow$

$D \downarrow$

$k_0 < 1$  时  $k_0 \downarrow$

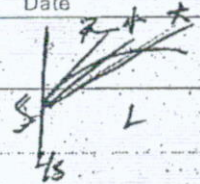
$k_0 > 1$  时  $k_0 \uparrow$

外因:  $G \downarrow$   $R \uparrow$



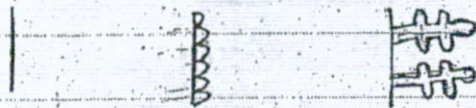
No. 材料 15

Date



### 3. 冷却速度对晶界形貌的影响

冷却速度: 无 小 大  
晶界形貌: 平直 胞状 树枝状



微观偏析程度: 无 小 大 (枝干先结晶处富含溶质元素)  
宏观偏析程度: 有大 小 微

### 4. 冷却速度对合金铸造性能的影响

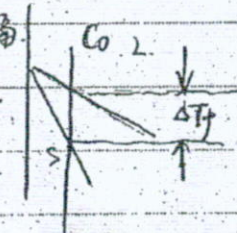
冷却速度大 → 流动性差, 枝晶偏析严重  
疏松, 集中缩孔

合金的铸造性能与凝固的关系

可以证明:  $-mC_0 \cdot \frac{1-k_0}{k_0} = \Delta T_f = T_L - T_S$

以凝固条件:  $\frac{G}{R} = \frac{\Delta T_f}{D}$

冷却速度:  $\frac{G}{R} < \frac{\Delta T_f}{D}$



(∵  $\Delta T_f$  越大则凝固速度越快  
而凝固速度越快, 枝晶偏析越严重  
所以合金铸造性能越差)

### 5-5. 共晶合金的凝固

一. 共晶体的形核与长大

1. 形核方式 — 搭桥机制

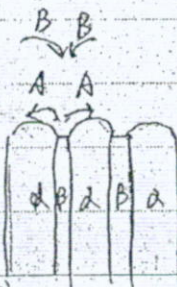
2. 晶面 — 平直状

横向扩散

3. 第三组元的影响 (有第三



组元就会生成  
冷却速度 — 形成  
胞状组织





## 二. 晶形貌

1. 金属-金属型: 晶体规则状 (两相时: 层状)

$$\Delta T_k = 0.01 \sim 0.05^\circ\text{C}$$

形状: 层状, 螺旋状

例: Pb-Sn, Zn-Mg, Cu-Ag

2. 金属-非金属型: 非规则状 (针状, 骨骼状)

Ag-Si

$$\Delta T_k = 1 \sim 2^\circ\text{C}$$

杂质: ① 平面 → 片状

② 针状 → 针状

## 三. 先共晶相组织 (一定)

1. 金属型: 树枝状 (微细粗糙)

2. 非金属型: 针状 (微细粗糙)

## §5-6 铸锭(件)的组织

### 一. 组织

1-3 区

表层细晶区 (激冷层)  $\Delta T$  很大 → 析出均匀多核

柱状晶区: 定向生长 (与散热方向相反生长)

中心等轴晶区: 晶核 (结晶器入)

非定向生长

结晶温度 ( $\Delta T$ ) → 结晶

新的结晶中心

均匀多核



4. 影响组织因素 (主要影响柱状晶区中心等轴晶区及相含板及等轴晶的晶粒大小)



不利成核与生长  
 浇铸温度高↑  
 铸模散热能力快↑  
 定向散热  
 合金的 $\Delta T_f$ 要小↓  
 粒状晶发达(柱)

成晶过快, 粒状晶停止生长  
 亦可能产生新晶核

利于成核与生长  
 浇铸温度低↓  
 铸模散热能力慢↓  
 粒状晶发达  
 中心等轴晶粒发达  
 加机械搅拌、振动

## 二. 铸锭的缺陷

### 1. 偏析:

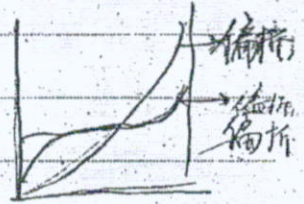
(1) 正偏析  $k_0 < 1$ , 表层溶质含量小于中心  
 ↳ 成因: 减小溶质混合的程度

(2) 反偏析  $k_0 < 1$ , 表层溶质含量大于中心

树枝状

(3) 比重偏析 固体与液体的重大

减轻措施:  
 ↑ 温度  
 加第二组元骨架  
 连续消除正常偏析 金属枝晶



### 2. 铸造: 树枝晶

减轻: 压力铸造  
 铸后压力加工 破碎

### 3. 共晶和过冷

共晶: 外来(铸造)过冷  
 过冷: 溶解度下降 → 减小  
 过冷: 合金成分



三. 焊缝的组织: 焊缝铁素体 组织特点 铁素化;

1. 无扩散过程:  $\Delta T \downarrow$
2. 主要是枝状晶

偏析: 中心线偏析



## § 5.7. 凝固技术的应用

### 一. E-域提纯

$$(C_0 - C_s) dx = L dc_s$$

$$\frac{C_0}{L} \int_0^1 dx = \int_{C_0}^{C_s} \frac{dc_s}{C_0 - C_s}$$

$$C_s = C_0 [1 - (1 - k_0) \exp(-\frac{Lx}{C_0})]$$

### 二. 定向凝固技术

### 三. 单晶制备 { 坩埚直拉法, 悬浮区熔法 }

### 四. 非晶制备

## Chapter 6. 原子扩散

### § 6-1. 扩散定律

#### 一. 菲克第一定律

在稳态扩散条件下,  $\frac{dc}{dt} = 0$

→ 稳态扩散时, 扩散通量与浓度梯度成正比

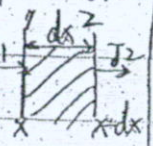
$$J = -D \frac{dc}{dx}$$

(J - 扩散通量) 单位时间内通过垂直于扩散方向的单位截面积的扩散物质的量

#### 二. 菲克第二定律

在非稳态扩散中,  $\frac{dc}{dt} \neq 0$   $\frac{dJ}{dt} \neq 0$

$$\frac{dc}{dt} = \frac{J_1 - J_2}{\Delta x} \quad (6-2) \quad J_1 = \int_0^x J dx$$



$$J_1 = -D \left( \frac{dc}{dx} \right)_x$$

$$J_2 = J_1 + \left( \frac{dJ}{dx} \right) dx$$

$$\Rightarrow \text{则: } J_1 - J_2 = \frac{\partial (D \frac{dc}{dx})}{\partial x} dx \quad (6-3)$$

$\left( \frac{dc}{dx} \right)$  - 浓度梯度  $g/cm^2$  或  $1/cm^2$  (用原单位表示)

(D - 扩散系数) 单位浓度梯度所引起的扩散通量  $cm^2/s$

" - " 代表扩散的总 X 浓度高处向低处扩散, 说明  $\frac{dc}{dx} < 0$



6.3 代入 6.2 得

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left( D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right)$$

$$\text{例: } \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

二. 扩散定律的应用

$$\text{应用 1: } J = -D \frac{dC}{dx} = -D \frac{C_2 - C_1}{\Delta x}$$

fick 定律

$$C = S \sqrt{P} \quad (S - \text{扩散系数}, P - \text{气体压力}, C - \text{气体})$$

$$J = -DS \frac{\sqrt{P_2} - \sqrt{P_1}}{\Delta x} \quad \text{在扩散中的能和解度}$$

$$D = \frac{J}{S \frac{\sqrt{P_2} - \sqrt{P_1}}{\Delta x}} \quad (J, S, P_2, P_1, \Delta x \text{ 均测})$$

fick 定律的应用

$$\text{例 2: } \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{通过高斯误差函数求解}$$

$$\text{通解 } C(x,t) = A + B \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

$$\operatorname{erf}(p) \text{ 的性质: } \operatorname{erf}(0) = 0$$

$$\operatorname{erf}(\infty) = 1$$

$$\operatorname{erf}(-p) = -\operatorname{erf}(p)$$

$$\text{例: } C_1 = A + B, C_2 = A - B \Rightarrow \begin{cases} A = \frac{C_1 + C_2}{2} \\ B = \frac{C_1 - C_2}{2} \end{cases}$$

$$\text{得: } C(x,t) = \frac{C_1 + C_2}{2} + \frac{C_1 - C_2}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

(2) 半无限长

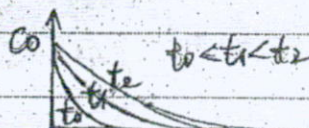
$$\begin{cases} C_1 \\ C_2 \end{cases} \quad \text{例: 钢的气体渗碳} \\ \text{低碳钢}$$

$$\text{初始条件: } t=0, x>0, C=C_1$$

$$\text{边界条件: } t>0 \quad \begin{cases} x=0, C=C_2 \\ x=\infty, C=C_1 \end{cases}$$

$$\text{得: } C_0 = A \Rightarrow \begin{cases} A = C_0 \\ B = C_1 - C_0 = -(C_0 - C_1) \end{cases}$$

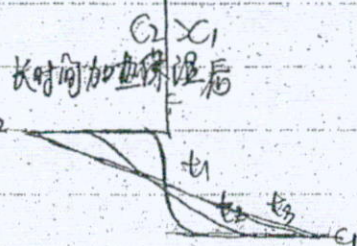
$$\text{得: } C(x,t) = C_0 - (C_0 - C_1) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$



C1

11. 无限长的扩散 初始条件下的非稳态扩散

$C_2$	$C_1$
高碳钢	低碳钢



$$\begin{aligned} x=0 \\ t_3 > t_2 > t_1 \end{aligned}$$

$$C(x,t) = A + B \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

$$\text{初始条件: } t=0 \quad \begin{cases} x>0, C=C_1 \\ x=0, C=C_2 \end{cases}$$

$$\text{边界条件: } t>0 \quad \begin{cases} x=0, C=C_2 \\ x=\infty, C=C_1 \end{cases}$$

6.2. 扩散的微观机制

一. 扩散的主要机制

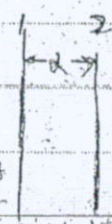
1. 柯肯达尔效应与空位机制

对于扩散  $\left\{ \begin{array}{l} \text{纯金属} \\ \text{置换固溶体} \end{array} \right\}$  空位机制

柯肯达尔效应证明扩散的机制是空位机制

2. 间隙机制

间隙固溶体



二. 扩散系数

1. 面内单位面积内有  $n$  个原子

2. 面内单位面积内有  $n_s$  个空位

且  $n_1 > n_2$

扩散系数  $D$

在扩散方向上的概率  $P$



No.

Date

dt. 时间内:  $N_1 = N_2 = A P E dt$   
 $N_{1 \rightarrow 2} = n_1 P E dt$

$$T = \frac{1}{2} P_0 \exp\left(-\frac{\Delta H - T \Delta S}{RT}\right)$$

2. 由增加可移动原子:  $N_1 = N_2 = (n_1 - n_2) P E dt = J A dt = \frac{1}{2} P_0 \exp\left(\frac{\Delta S}{R}\right) \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \lambda A D$

$$J = (n_1 - n_2) P E \dots (1)$$

$$D = \frac{1}{2} P E = \frac{1}{2} P_0 \exp\left(\frac{\Delta S}{R}\right) \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right)$$

1. 面内溶质原子的体积浓度:  $C_1 = \frac{n_1}{N_A}$

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \dots \text{间隙扩散}$$

2. ---

$$C_2 = \frac{n_2}{N_A}$$

$$\Rightarrow C_2 = C_1 + \frac{dc}{dx} \Rightarrow C_1 - C_2 = -\frac{dc}{dx} \dots \text{空位扩散}$$

$$n_1 - n_2 = -\frac{dc}{dx} \dots (2)$$

$$T = \frac{1}{2} P_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_1}{RT} + \frac{\Delta S_1}{R}\right) \exp\left(-\frac{\Delta E_m}{RT} + \frac{\Delta S_m}{R}\right)$$

$$\Rightarrow J = -D \frac{dc}{dx} \dots (3)$$

( $\Delta E_1$  - 空位形成能;  $\Delta S_1$  - 空位形成熵)

比较 (3) 和  $J = -D \frac{dc}{dx}$

( $\Delta E_m$  - 空位移动能;  $\Delta S_m$  - 空位移动熵)

$$\Rightarrow D = \frac{1}{2} P E$$

$$\Rightarrow D = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_m + \Delta E_1}{RT}\right) = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_{tot}}{RT}\right)$$

注:  $T$  - 跳跃频率

空位扩散

$\lambda$  - 扩散跳跃方向上的平均间距

$\lambda \rightarrow$  扩散的跳跃力

$P$  - 跳跃的概率

对扩散有直接影响的跳跃位置

上坡扩散 - 扩散从高浓度处向低浓度处

上坡: (i) D.S.T 扩散

下坡扩散 - 扩散从低浓度处向高浓度处

(ii) D.S. 扩散的有类

扩散:  $A \rightarrow P$

(iii) 例如: 主晶与晶界之间的扩散

$$F = -\frac{d\mu}{dx} \dots \text{化学位梯度}$$

$$\text{简单扩散} \quad \alpha \quad \frac{1}{6} \quad \frac{1}{6} a^2 T$$

5.6.4. 反互扩散

$$\text{体心立方} \quad \frac{1}{2} a \quad \frac{1}{8} \quad \frac{1}{8} a^2 T$$

反互扩散: 有新相形成时扩散

$$\text{面心立方} \quad \frac{1}{2} a \quad \frac{1}{12} \quad \frac{1}{24} a^2 T$$

扩散方向: (1)  $T$   $D = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right)$

注: (1) 扩散系数与时间间隔成正比和扩散距离成正比

(2) 晶体结构的键力和晶体结构

晶体结构: 体心立方, 面心立方, 简单立方  
 扩散: 体心立方 > 面心立方 > 简单立方  
 原因: 体心立方中, 原子间空隙较大, 扩散更容易

3. 扩散的激活能

(1) 键力越强, 扩散越慢

(2) 晶体结构: BCC, FCC, SC (简单立方)

1. 间隙扩散: 跳跃频率  $T$

$$T = \frac{1}{2} P_0 \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right)$$

$C$  - 点阵频率;  $\lambda$  - 扩散跳跃距离

$P_0$  - 空位几率;  $\Delta H$  - 扩散活化能 ( $\Delta H - T \Delta S$ )

晶

(3) 固体中的扩散: 位置

(1) 类型: 间隙扩散 > 空位扩散

(2) 扩散系数:  $D = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right)$

(3) 晶体缺陷: 晶界, 位错, 空位

(4) 晶体缺陷: 晶界, 位错, 空位

(5) 晶体缺陷: 晶界, 位错, 空位



6. 多分散性 不同的混合物中分子量的相对质量不相等的现象

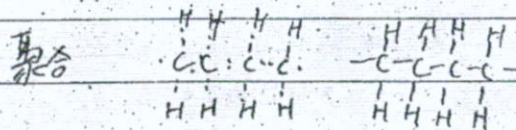
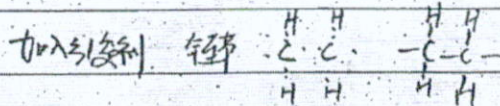
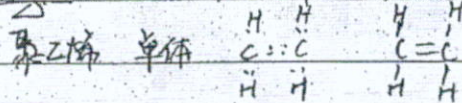
7. 平均分子量

① 数均分子量  $\bar{M}_n = \sum N_i M_i / \sum N_i$

② 重均分子量  $\bar{M}_w = \sum N_i M_i^2 / \sum N_i M_i$

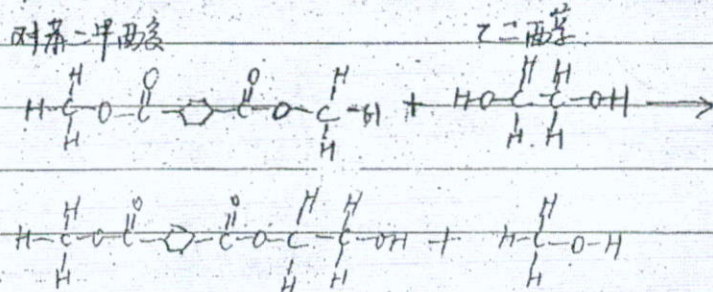
二. 高分子材料的合成: 加聚、缩聚

1. 加聚反应 —— 一种或几种单体相互加成而直接成为聚合物



2. 缩聚反应 —— 一种或几种单体相互缩合而直接成为聚合物, 同时析出某种低分子物质的反应

聚酯纤维 (三纶)



三. 高分子材料的分类:

按聚合反应的类型 | 加聚聚合物  
| 缩聚聚合物



No. \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

高分子的形状 | 线型聚合物  
| 体型聚合物 | 交联型  
| 网状型

按聚合物的热性能: | 热塑性聚合物: 尼龙, 有机玻璃, 生橡胶  
| 热固性聚合物: 酚醛树脂, 环氧树脂, 硫化橡胶

### §7-2 高分子的结构与构象

#### 一. 高分子的化学组成:

由主链和侧基组成 | 按主链的组成 | 碳链高分子  
| 杂链高分子  
| 无支有机高分子

1. 碳链高分子 —— 主链由相同的碳原子聚合而成

2. 杂链高分子 —— 主链由碳及其他原子聚合而成

3. 无支有机高分子 —— 主链由大原子 (S, Te, Al, B) 及有机大基团组成 (O)

#### 二. 结构单元的链接

1. 链节对称: 链接方式只有一种  $-(C-C-C)-$

链节不对称: 一种单体 (如:  $CH_2=CHX$ ) | 头-头 (尾-尾)  
| 头-尾

链中单体: | 头-头共聚  
| 交替共聚  
| 嵌段共聚  
| 接枝共聚

2. 空间构型: —— 结构单元在化学键构成的空间排列

① 全同异构 —— 取代基全部在同一侧

② 间同异构 —— 取代基相间的键在主链的两侧

③ 无规异构 —— 取代基不规则地分布在主链两侧



三 高分子链的几何形状 / 线型、热塑性 硬↓ 强↓ 韧↑

1 体型：热固性 硬↑ 强↑ 韧↓

#### 四 高分子链的构象及柔顺性

1. 高分子链的单键内旋转

2. 高分子链的构象——由内旋转引起的原子在空间上占据不同的位置

可构成的高分子链的总称

3. 高分子链的柔顺性——高分子链由于构象变化而获得的不同构象程度的特性

度量——键长  $r$

键角  $\theta$

链段：高分子链中能独立运动

的最小单元

柔性链——小 容易内旋转

刚性链——大 不容易旋转

4. 影响分子链柔顺性的主要因素

① 主链结构：主链全由单键构成，柔顺性最好。



主链中有双键：柔顺性较差

主链中有杂原子：柔顺性较差

② 侧基性质：极性：越大→链柔性越差

体积：越大→链柔性越差

对称性：对称→柔性越好

#### 5. 高分子的聚集态结构（晶态、非晶态）

一、晶态 有序最大（缨状胶束模型，折迭链结构模型）

二、部分晶态

三、非晶态 有序最小（无规线团模型，松散链结构模型）



No. \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

#### ④ 聚合物的结晶度与玻璃化温度

1. 结晶度——晶态聚合物中结晶的程度

重量结晶度 
$$f_c^w = \frac{w_c}{(w_c + w_a)} \times 100\%$$

体积结晶度 
$$f_c^v = \frac{v_c}{(v_c + v_a)} \times 100\%$$

#### 2. 分子结构对结晶能力的影响

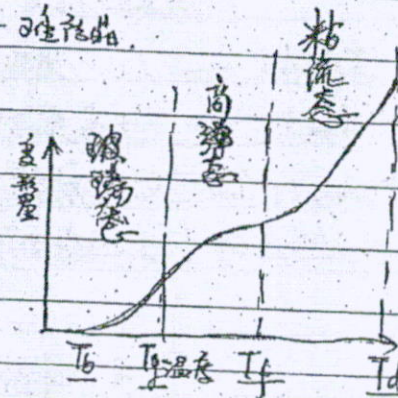
体型高分子结晶能力差

线型高分子结晶能力：简单、规整、对称、易结晶（如：聚乙烯）  
 单规——易结晶（如：全同立构、间同立构）  
 缩聚物——易结晶  
 支链型——难结晶

#### 3. 高分子聚合物的三种物理状态

对线型非晶态

$T_b$ ——脆化温度（开始伸长） Brittle  
 $T_g$ ——玻璃温度 glass  
 $T_f$ ——粘流温度 flow  
 $T_d$ ——分解温度 decomposition



1° $T < T_g$ 玻璃态	硬度高，强度高，但较脆	链段都不可动
2° $T_g < T < T_f$ 高弹态	有较高的弹性	链段可动
3° $T_f < T < T_d$ 粘流态		链段可动

塑料：室温下处于玻璃态的高分子

橡胶：室温下处于高弹态的高分子

粘流态是高分子材料的成型态



## §7-4 高分子材料的性能与结构

## 一. 性能特点

1. 优点
  - ① 原料丰富, 成本低 (德)
  - ② 密度小  $\sim 1.9/\text{cm}^3$
  - ③ 高的化学稳定性, 耐腐蚀 (如: 聚四氟乙烯 — 抗强氧化)
  - ④ 耐磨性
    - 大摩擦系数: 橡胶
    - 小摩擦系数: PE, 涂层
  - ⑤ 电绝缘: 无自由电子.
  - ⑥ 绝热: 无自由电子, 所以导热效果不好, 靠分子导热.
  - ⑦ 良好的光学性能, 有机玻璃.

## 2. 缺点: ① 强度低

② 弹性模量小, ( $E$ 小)

③ 热性能差

④ 易蠕变 应力松弛

⑤ 易老化
 

- 降解, 强度 $\downarrow$ , 弹性 $\downarrow$
- 交联, 脆

## 二. 性能与结构关系

1. 热塑性塑料: 强度 $\downarrow$ , 硬度 $\downarrow$ , 柔韧性 $\uparrow$ ,  $E$  $\downarrow$ , 弹性 $\uparrow$ , 线型分子链2. 热固性塑料: 强度 $\uparrow$ , 硬度 $\uparrow$ , 脆 $\uparrow$ , 体型分子链

## 三. 改变高分子材料的途径

## 1. 改变结晶度

结晶度 $\uparrow \rightarrow$ 弹性 $\uparrow$ , 强度 $\uparrow$ , 弹性模量 $\uparrow$ , 塑性 $\downarrow$ , 密度 $\uparrow$ 

## 2. 改变侧基性质

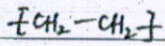
 $\text{—CH}_2\text{—CH}_2\text{—}$  易 $\text{—CH}_2\text{—CH}_3$  不易



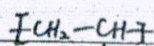
No.

Date

柔性链  $\rightarrow$  刚性链

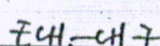


柔性链



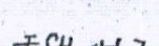
聚乙烯

柔性链



聚氯乙烯

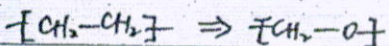
刚性链



聚丙烯

刚性链

### 3. 改变主链结构



聚甲醛

抗拉强度提高 (由 17.5 MPa 提高到 62.1~69 MPa)

### 4. 共聚 — 两种或两种以上单体形成聚合物

ABS 塑料: 苯乙烯 (A) — 丙烯腈 (B) — 丁二烯 (S)

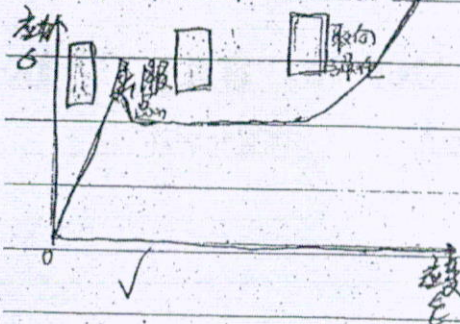


存在两个相: 苯乙烯 — 丙烯腈  $\Rightarrow$  SAN 塑料 基体

丁二烯 — 丙烯腈  $\Rightarrow$  BS 橡胶 颗粒

硬度 ↑, 韧性 ↑, 刚性 ↑

### 5. 拉伸强化 (取向强化)



强度 ↑, 弹性模量 ↑



合金: 固溶强化 (第2相强化)  
 多晶: 细晶强化  
 纯金属: 加工硬化

No. 材料

Date 31

## 第八章 材料的变形与断裂

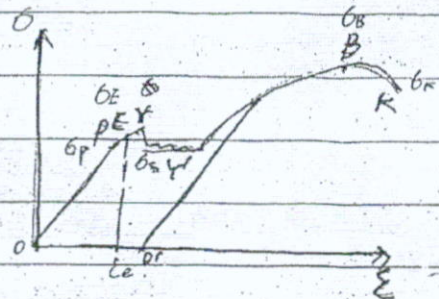
### §8-1 概述

#### 一、拉伸—应力—应变曲线

弹性变形阶段 (OE) / 弹性变形 (OP) ①  
 非弹性变形 (PE) ②

其卸载后沿原线返回。

塑性变形阶段 (不卸载时快些, 卸载后有残余变形)  
 伸长 0.01%



(E.B.) / 屈服阶段 (E.Y.): 有上屈服点和下屈服点 / 屈服强度 ①  
 均匀塑性变形 (Y.B.) / 屈服延伸 ②  
 局部塑性变形 (至局部颈缩) ③

### §8-2 弹性变形

一、特点 / 完全可逆  
 完全弹性:  $\frac{\sigma}{\epsilon} = E$

二、弹性模量的物理意义——反映材料中原子或分子间结合键大小

金 陶 高

中 大 小

E 对组织敏感

三、弹性模量在工程上的应用——在结构设计时

刚度: 零件抵抗弹性变形的能力

$$\frac{F}{\epsilon} = \frac{\sigma \cdot A_0}{\epsilon} = \frac{E \cdot A_0}{\text{刚度}}$$

### §8-3 单晶体的滑移变形

塑性变形的形式 / 滑移  
 孪生  
 晶界滑动



No. \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

## 一. 晶体滑移现象及观察

1. 晶体滑移指晶体中相邻晶面的相对滑动

2. 晶体滑移的观察: 滑移线  
滑移带

## 二. 滑移的机理

1. 晶体的滑移是通过晶体中位错的移动而进行

2. ~~晶体的滑移~~ 理想晶体中位错在应力作用下运动时克服的阻力  
晶体材料对晶体中位错滑移的阻力

$$\tau_{cr} = \frac{2\pi G b}{1-\nu} e^{-\frac{2\pi G b}{(1-\nu)b}} = \frac{2\pi G b}{1-\nu} e^{-\frac{2\pi W}{b}}$$

其他阻力

晶界

杂质原子

第二相粒子

其他位错所给的阻力

$\tau$  — 滑移力

$b$  — 滑移面的面间距

晶面间距和方向  $b_{min}$   $a_{max}$

$b$  — 滑移方向上的原子间距 (在滑移面的法线方向)

$W$  — 位错宽度  $W = \frac{Q}{Lr}$

结论: 1)  $W \uparrow \rightarrow \tau_{cr} \downarrow$

2) 晶体的滑移发生在  $\frac{Q}{b}$  大的面上

从拉伸曲线上可得到如下的指标

强度指标	6061 极限 $\sigma_p$	弹性指标	$E$
	弹性极限 $\sigma_e$		$\epsilon_e$ 弹性形变阶段的变形
	屈服强度 $\sigma_s$		$\epsilon$ 弹性比功 $u = \frac{1}{2} \sigma_e \epsilon_e = \frac{\sigma_e^2}{2E}$
	强度极限 $\sigma_b$		
	断裂强度 $\sigma_K (S_K)$		
塑性指标	$\delta$ (延伸率) $= \frac{l-l_0}{l_0}$		
	$\psi$ (断面收缩率)		



3. 滑移系 —— 滑移面及滑移面内的滑移方向 (因为  $\frac{\text{面间距}}{\text{面间距}} = \text{体心距}$ , 12个面)  
 ↳ 由原子的最密排面的最密排方向 密度为定值, 因此面间距最大的面 即为面间距最大的面

fcc:  $\{111\} \langle \bar{1}10 \rangle$   $4 \times 3 = 12$  个

bcc:  $\{110\} \langle \bar{1}11 \rangle$   $6 \times 2 = 12$  个

次  $\{112\} \langle \bar{1}11 \rangle$   $12 \times 1 = 12$  个

次  $\{123\} \langle \bar{1}11 \rangle$   $24 \times 1 = 24$  个

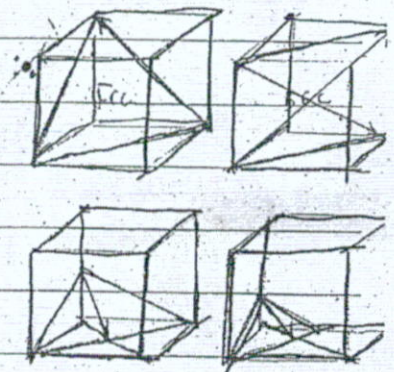
hcp:  $\{0001\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$   $1 \times 3 = 3$

次  $\frac{c}{a} \approx 1.633$  次  $\frac{c}{a} < 1.633$  时  $\{10\bar{1}0\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$  次滑移面

次  $\{1\bar{1}00\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$   $3 \times 1 = 3$

次  $\{10\bar{1}1\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$   $6 \times 1 = 6$

次  $\{1\bar{2}10\} \langle 10\bar{1}0 \rangle$   $3 \times 1 = 3$  (去掉平行面)



### 三. 结晶学定律

1. 作用在滑移系上的合力 (合力大的滑移系最先开始运动)

解:  $\{111\} [\bar{1}10]$  面的合力  $F$  在  $[001]$  方向

$$T = \frac{F}{A} = \frac{F \cos \lambda}{A_0} = \frac{F}{A_0} \cos \phi \cos \lambda$$

$$\cos \phi = \frac{[001] \cdot [111]}{|[001]| | [111]|} = \frac{0}{\sqrt{2}}$$

$$\cos \lambda = \frac{[001] \cdot [\bar{1}10]}{|[001]| | [\bar{1}10]|} = \frac{0}{\sqrt{2}}$$

$$\therefore T = 0 \cos \phi \cos \lambda = 0 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{0}{\sqrt{2}} = 0$$

$\lambda$ :  $F$  和滑移面

$\phi$ :  $F$  和滑移线

### 2. 施密特定律

$T_c = \sigma_c \cos \phi \cos \lambda$  当达到  $\sigma_c$  时开始滑移

利用标度法

### 3. 始滑移系的判断

计算法

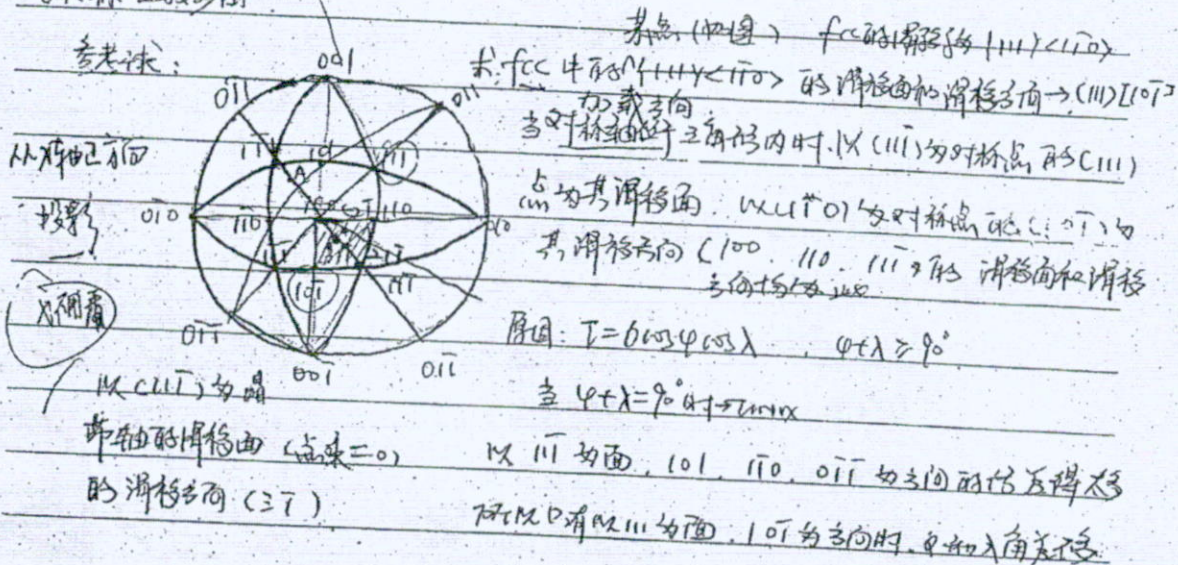
作图法



No.   
 Date

## 利用标准投影图判断滑移系

### ① 求标准投影图



## 五. 滑移过程中的晶体转动

夹头自由

夹头固定

拉伸:  $\varphi \uparrow$ ,  $r \downarrow$  \* 滑移面压起来, 使滑移系向滑移

压缩: 力轴向滑移面压, 使滑移系向转动

100, 111, 110 等面 \* 为: FCC中111 拉伸和压缩 [521], 在拉伸时向着 [101]

发生转动, 而在A点可能

完全平移到, 转动一个角度

小转动位置

转动(滑移方向) 转动时转动轴为 [521] 和 [101]

见上图, 当转动到 [311] — 即 [211] 与 [101]

的连线这时, 其位于两个三角形的交界线, 另一个

三角形也发生滑移 [111] [110] 其转动方向110 与

向转动, 由于向着 <110> 又向 <101> 转, 所以向

<111> 方向转, 当正到三轴共面时 [211] 则停止转动

## 六. 晶体的单滑移、多滑移及交滑移

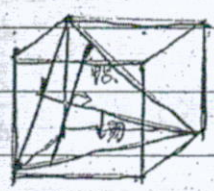
1. 晶体的单滑移 — 只有一个滑移系被启动的滑移



如: fcc 的  $(111)[10\bar{1}]$

2. 多滑移:

3. 交滑移: 当一个滑移系动作受阻后



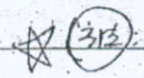
一个已启动滑移系(原)有相同滑移方向但不同滑

移面进行交滑移, 重新启动

移面的滑移系开始

① 如: 521 向 311 滑移时, 初始滑移系  $T10\bar{1}](11\bar{1})$ , 遇到障碍后停止并改

到另一个  $[10\bar{1}](11\bar{1})$  面滑移



以 101 为滑移轴找其对称面



上面只有  $T111Y$  系

其中 111 为原来的, 因此  $(111)$  面为交滑移面

② 晶体的交滑移即是以晶体中螺位错的交滑移开始的

### § 8-4 单晶体中的孪生现象

一. 孪生现象的观察



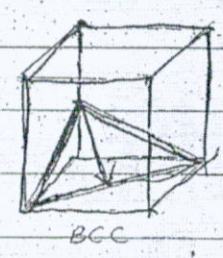
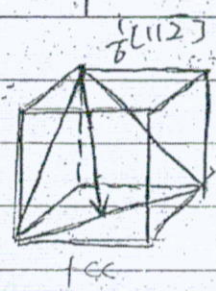
晶体中通过切变形成孪晶, 孪晶与基体晶体结构相同但位向成镜面对称

2. 观察: 表面浮凸 —— 表面

孪晶(变形孪晶) —— 内部

### 二. 孪生系统

- fcc:  $\{111\} \langle 11\bar{2} \rangle$
- bcc:  $\{112\} \langle 11\bar{1} \rangle$
- HCP:  $\{10\bar{1}2\} \langle \bar{1}011 \rangle$



如: 对 fcc 每一层的滑移面均作  $\frac{1}{6}[11\bar{2}]$  即滑移距离

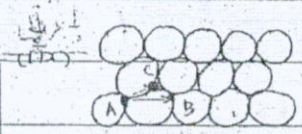
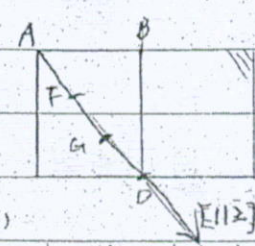
### 四. 孪生的位错机制

位错的位错机制(fcc)

五. 孪生的四要素 fcc

1. 不畸变面  $K_1 = (111)$   $K_2 = (11\bar{1})$

2. 不畸变方向  $\eta_1 = [11\bar{2}]$   $\eta_2 = [112]$



B — 正滑位置, 正滑距离

C — 孪生的位错位置(在 AC =  $\frac{1}{6}a$ )

孪生即产生



No. \_\_\_\_\_

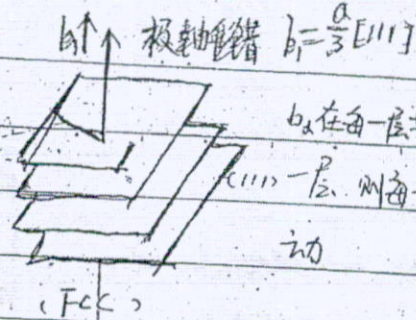
Date \_\_\_\_\_

## 二、孪生时晶体长度变化

$k_1$  为狭角区内的晶面间距

$b = \frac{a}{\sqrt{3}} [111]$

$k_2$  为钝角区内的晶面间距



$b$  在每一层扫过

$(111)$  一层，则每一层发生滑

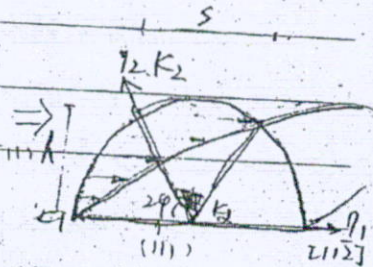
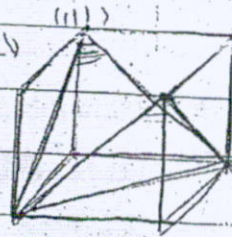
动

## 密排六方晶的长度变化规律

$\frac{c}{a} > \sqrt{3}$  变形 ( $2\varphi < 90^\circ$ ) 如:  $[0001]$

$\frac{c}{a} < \sqrt{3}$   $2\varphi > 90^\circ$  伸长 (如:  $[0001]$ )

当不能伸长，也不能缩短时，就发生滑移



回要 (孪生): 每一层的相对滑移量是一定的

$k_1$  为钝角区面， $k_2$  为锐角区面，两个不平行方向  $\eta_1, \eta_2$

拉伸时在钝角区孪生 (同时伸长)  
压缩时在锐角区孪生 (同时缩短)

## 密排六方晶的长度变化规律

### 七、孪生时的切变率



$k$  为  $\frac{1}{\sqrt{3}} [112]$  的间距

$$r = \frac{c}{k} = 2 \frac{c}{\sqrt{3} a} = 2 \cot 2\varphi$$

$$\text{fcc: } r = \frac{b}{a} = 0.707$$

$$2\varphi = 70.52^\circ \quad (k_1, k_2 \text{ 取两个 } (111) \text{ 面的夹角})$$

或者: 用滑移距离除以面间距  $= r$

$$r = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{a}{2}}{\frac{a}{\sqrt{3}}} = \frac{1}{2}$$



### 八、孪生与滑移的比较

滑移	作用力	滑移面 (hkl)	滑移方向	滑移距离	孪生	滑移面
滑移	切应力	$\{111\}$	$\langle 110 \rangle$	滑移方向与滑移面间距的乘积	孪生	$\{111\}$
孪生	正应力	$\{111\}$	$\langle 112 \rangle$	滑移方向与滑移面间距的乘积	孪生	$\{111\}$



## 九. 影响孪生变形的因素:

(孪生的滑移切应力比滑移的切应力大, 因此优先发生滑移。而且滑移容易, 滑移孪生不易孪生)

## 1. 滑移系

多	少	fcc	BCC	HCP
易滑移	易孪生	不易孪生	易孪生	易孪生
		低温连冲去	(冲去, 低温)	
		极低温孪生	70%孪生	

## 2. 层错能:

(层错能低的, 易孪生, 孪生使相邻两面的原子层错, 不易反滑移)




## 十. 孪生取向:

对塑性变形量影响不大, 当滑移困难时, 孪生受取向, 有助于滑移

## 补充①: 扩展位错的交滑移:

螺位错  $\Rightarrow$  扩展位错 (其两个不全位错都不在螺位错线, 而通过束集(局部合并)形成滑移)

## ② 单滑移, 多滑移, 交滑移滑移线的区别

单滑移: 只有一组平行的滑移线   
 多滑移: 多组相交的滑移线   
 交滑移: 滑移线为波状, 大的 

晶体结构	晶体取向	表面形貌	晶体内部
不变	不变	平面, 滑移线	无
不变	改变, 对称	滑移	滑移



No. \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

★ 例: BCC 的单晶试样在  $[21\bar{5}]$  方向拉伸 (1) 初始的滑移系为什么?

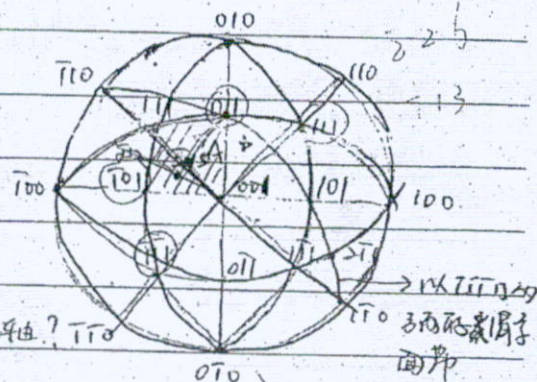
(1) 初始滑移系为什么?  $(011)[\bar{1}\bar{1}1]$

(2) 可能取到的滑移系:

$(\bar{1}10)[\bar{1}\bar{1}1]$   $(011)$

$(101)[\bar{1}\bar{1}1]$   $(011)$

注:  $(\bar{1}10)$  和  $(110)$  等价的



★ 如果拉伸过程中, 力轴的取向规律, 转轴?  $\bar{1}\bar{1}0$

初始滑移系  $(011)[\bar{1}\bar{1}1]$  转轴  $(011)[\bar{1}\bar{1}1] \times [21\bar{5}] = [11\bar{2}]$

力轴向滑移面转动 晶面转动

(4) 双滑移系是什么?

$(011)[\bar{1}\bar{1}1] + (\bar{1}10)[111]$

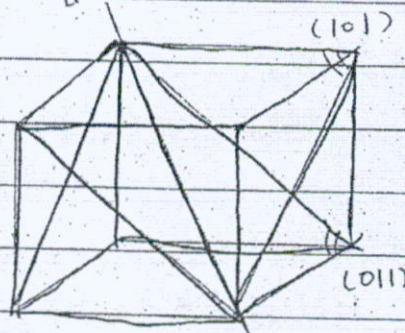
★ 双滑移系启动时的取向规律

1° A点 (两线交点)  $[\bar{1}\bar{1}3]$

2°  $[11\bar{2}] \times [21\bar{5}] = [11\bar{2}] \rightarrow [\bar{1}\bar{1}3]$

★ 力轴取最终取向

件轴在双线交点上  $[\bar{1}01] + [011] = [\bar{1}\bar{1}2]$  此时, 不会继续转动



作业: 把例中的 BCC 改为 FCC

## §8.5 多晶体的塑性变形

一 多晶体的塑性变形的特点

1. 各晶粒变形的不同步性, 不均匀性 (任何有利晶粒先滑移, 其形变量大)

2. 晶界对晶体滑移的阻碍

3. 多晶体的位错性

位错在晶界前产生位错塞积群

造成了位错塞积群





4. 协调性 (每个晶粒要屈服, 必须要有 6 个独立的滑移系)

$$\Delta V = \epsilon_{xy} + \epsilon_{yz} + \epsilon_{zx} = 0$$

六个独立的滑移系

5 个独立的滑移系

二. 细晶强化: (多晶体的强度与晶粒细化)

1. 霍尔-佩奇: 对同一种晶体, 晶粒细小比晶粒粗大有更高的强度、硬度、更好的塑性和韧性. (只有晶粒细化同时提高强度、硬度、塑性和韧性, 其余的方面都会牺牲某些方面的特性)

2. 霍尔-佩奇公式: Holl - Perck

$$\sigma_s = \sigma_0 + k d^{-1/2}$$

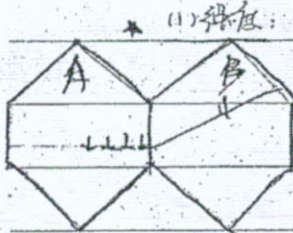
$\sigma_s$  - 屈服强度

$d$  - 晶粒直径

3. 细晶强化 (解释晶粒细化)

$k$  - 系数 (材料)

$\sigma_0$  - 截距

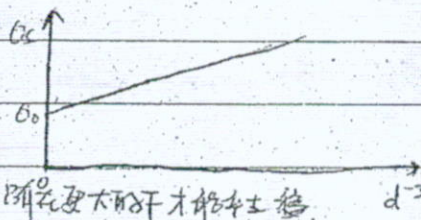


(1) 强度: 晶粒细小

位错塞积群少, 其

应力场小, 在 B 晶

中的应力贡献小, 所以需要更大的应力才能发生塑性变形



(2) 塑性: 变形量大, 出现裂纹晚, 所以细晶强化 (1) 其好处小, 细晶强化是双刃剑

例题

在 FCC 单晶体的  $[111]$  方向进行拉伸, 已知屈服强度  $\sigma_s$

(1) 初始滑移系是什么?

(2) 晶体的  $T_c$  是多少? (3) 屈服时晶体中开动的位错和螺位错各是什么? 作用

在单位长度位错线上的力各是什么? (晶体的屈服是晶体中位错的滑移引起的)

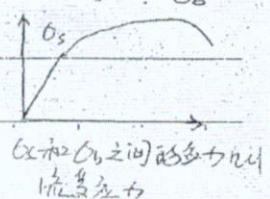


§8.6 纯金属的强化

加工硬化: 金属在塑性变形过程中, 其屈服强度随变形量而增大的现象

或者说: 金属经塑性变形后, 强度、硬度升高, 塑性降低

7 降



$\sigma_s$  和  $\sigma_b$  之间的应力称为屈服强度



No. \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

★ 发生形变强化原因 1) 位错间的交截产生割阶, 割阶阻碍位错运动

与位错系 2) 位错间的反应: 产生固定位错, 阻碍位错运动

3) 位错增殖: 位错密度提高, 阻碍位错运动

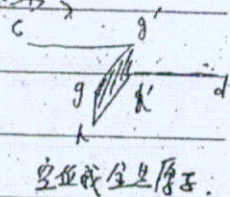
一. 位错的交截

判断交截的方法 1 形象法: 用位错运动就是多条半原子面的运动

抽象法: 位错线运动扫过的区域要发生相对运动, 大小与位错线的长度成正比

分析 1 扭折: 滑移面与原滑移面相同

割阶: 滑移面与原位错滑移面不相同 (阻碍位错运动)



二. 位错反应:

生成固定位错

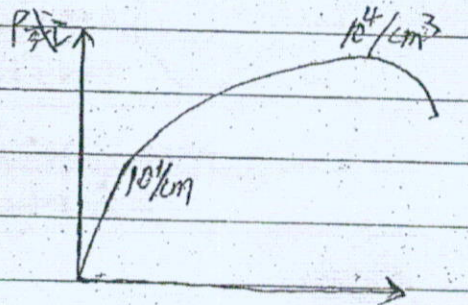
三. 位错增殖

1. F-R源

2. L源: (其正好为半个F-R源)

3. 双交滑移机制 (相对两个F-R源)

4. 流变应力与位错密度的关系



$$\sigma = \sigma_0 + \alpha G b \sqrt{\rho}$$

式中:  $\sigma$  - 流变应力

$\sigma_0$  - 无应变强化时的流变应力

$\rho$  - 位错密度

$\alpha$  - 0.3 ~ 0.5

§ 8.7 合金的塑性变形与强化

一. 固溶强化:

固溶强化 - 与纯金属相比, 固溶体的强度、硬度升高, 塑性韧性下降

2. 溶质原子与位错之间弹性交互作用, 阻碍位错



No. 材料

Date 36

10. 钢球

讨论:

1) 间隙原子:  $\Delta V > 0$  材料中最大的间隙原子半径

处在  $\pi < \theta < 2\pi$   $LI < 0$

间隙原子在刃位错附近其能量是最低的

2) 置换原子:  $\Delta V > 0 \Rightarrow$  在下方  $LI < 0$

小极大

$\Delta V < 0 \Rightarrow$  在上方  $LI < 0$

3) 溶质原子在刃位错线周围

偏聚 称为柯氏气团

4) 对螺位错: 置换原子, fcc中的间隙原子, 不偏聚

bcc 间隙原子, sneek 气团

在螺位错周围的偏聚

$$LI = -W$$

$$W = G_m \cdot 4\pi r_0^2 \cdot \Delta r$$

$$\Delta r = r_1 - r_0$$

$$G_m = \frac{1}{3}(G_{xx} + G_{yy} + G_{zz}) =$$

$$= \frac{-G_b}{3\pi} \cdot \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot \frac{\sin \theta}{r}$$

$$\text{得 } LI = \frac{G_b}{3\pi} \cdot \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot \frac{\sin \theta}{r} \cdot \Delta V$$

2. 影响固溶强化效果的主要因素

效果  $\frac{d\sigma_s}{dc}$

1) C 的影响: C 个  $G_s \uparrow$  但  $\frac{d\sigma_s}{dc} \downarrow$

2) 原子的相对尺寸: 置换:  $\Delta r \uparrow$  (原子半径与溶剂的半径差) 效果  $\uparrow$

间隙:  $\Delta r \downarrow$  效果  $\uparrow$

3) 溶质原子造成的晶格畸变的对称性

★ 球对称 - 弱强化

(置换原子, fcc 间隙原子)  $\rightarrow$  固溶强化作用

非球对称 - 强强化

(bcc 中的间隙原子)  $\rightarrow$  固溶强化作用与位错相互作用

交互作用

二. 低碳钢的屈服强度及应变时效



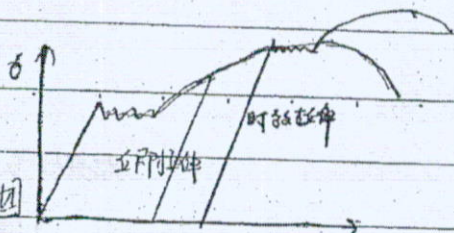
No. \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

### ★ 1. 屈服降落和屈服延伸

1) 现象:

2) 为什么? 屈服降落——钉扎位错的柯氏团



“脱钉”

屈服降落: 有上下屈服点,  $\sigma_s$  变化

延伸——屈服延伸——屈服后延伸和打散

屈服延伸:  $\epsilon_s$  变化, 但  $\sigma_s$  基本不变, 有一个屈服平台和打散

### ★ 2. 正火处理对钢的时效影响

1) 现象:

使韧性下降

时效  $\sigma_s$

自然时效: 放置

人工时效: 加热  $200^\circ\text{C}$

屈服强度增加(时效硬化)

★ 2) 原因: 屈服延伸由于心有钉扎, 因此原有屈服平台, 屈服强度提高

而时效延伸出现钉扎和加硬化, 有屈服平台,  $\sigma_s$  上升

3. 应用(工程)——光整冷轧

第2相与 $\alpha$ 之间

### ★ 3. 第2相粒子的时效

共析  $\rightarrow$  半共析  $\rightarrow$  亚共析共析

1. 时效强化: 2. 强化机理:

机理: 固溶处理: 过饱和 $\alpha$ 固溶体

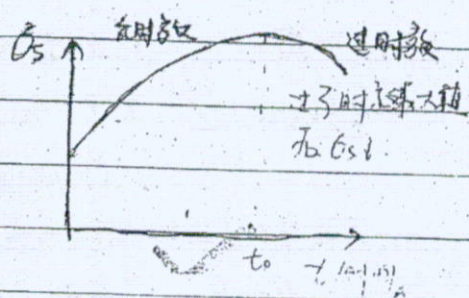
时效处理:  $\alpha + \alpha_2$  析出

1) 可变形的第2相粒子(时效初期)

析出物增大, 相界面面积增大

析出物  $\uparrow$ ,  $\sigma_s$   $\uparrow$

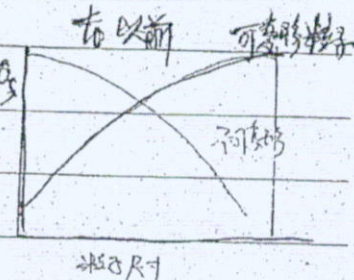
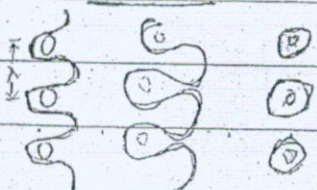
粒子应力场对位错有阻碍作用 ( $\sigma_s$  增大)



2) 不可变形的第2相粒子(时效后期)

(时效初期  $V_{析出} \uparrow \rightarrow N \uparrow$  时效后期  $V_{析出} \downarrow$ )

$$\bar{r} = \frac{G b}{\Delta \gamma}$$





### §8-8 冷变形金属的组织与性能变化

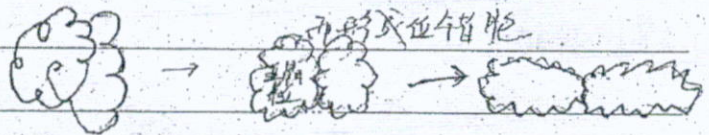
#### 一、显微组织变化：退火态

1. 晶粒形状：等轴晶 → 拉长的晶粒 → 纤维组织

2. 位错密度： $\rho$  ↑  $10^7 - 10^{12} / \text{cm}^2$

3. 位错组态：1. 高层位错：位错缠结 → 位错胞 → 拉大胞

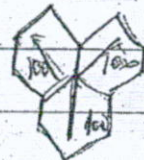
从图中位错胞的“推位错”、“叠层”或“层错”



低位错能：形成稳定的位错网络

#### 4. 形成孪晶：

5. ~~孪晶~~ 孪晶：对多晶体而言，单晶体也有结构：位向的选择性取向（变形大时原先不同位向趋于与轧制方向一致，这样的组织叫做纤维组织）

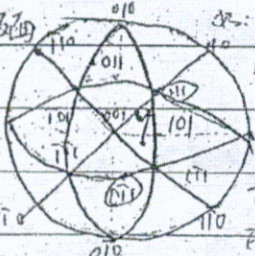


例：以单晶（fcc）轧板为例， $\{110\} \langle 112 \rangle$

1. 什么意义： $\{110\}$ 面：晶体面 $\{110\}$ 面转动到平行于轧面

$\langle 112 \rangle$ ：晶体的 $\langle 112 \rangle$ 方向平行于轧向

#### 2. 怎样形成：



注：1. 个晶体的 $\{110\}$ 面平行化  
2. 因轧制， $\{110\}$ 面平行化  
3. 轧制过程中在 $\{110\}$ 面周围，各晶粒

#### 二、性能变化：1. 加工硬化：有利

使材料塑性变形能力增加

因为加工硬化后，位错密度增加，位错运动受阻，所以变形能力增加

细晶强化大，不能加工硬化

加工硬化过速：↑

#### 2. 加工硬化：

1. 有害：不均匀变形（未淬）

使材料塑性变形能力增加

因为加工硬化后，位错密度增加，位错运动受阻，所以变形能力增加

细晶强化大，不能加工硬化

加工硬化过速：↑

2. 有利：强韧化（强韧化）

使材料塑性变形能力增加

因为加工硬化后，位错密度增加，位错运动受阻，所以变形能力增加

细晶强化大，不能加工硬化

加工硬化过速：↑



No. \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

3. 残余应力/有益: 引起工件变形和开裂

残余应力降低材料的屈服强度 (所以残余应力不利)

有利: 在零件表面产生残余应力, 可提高疲劳强度 (防止萌生裂纹)

方法: 喷丸、滚压 (使其产生与载荷相反的内应力)

4. 理化性能: 电阻率↓ 抗腐蚀能力↓

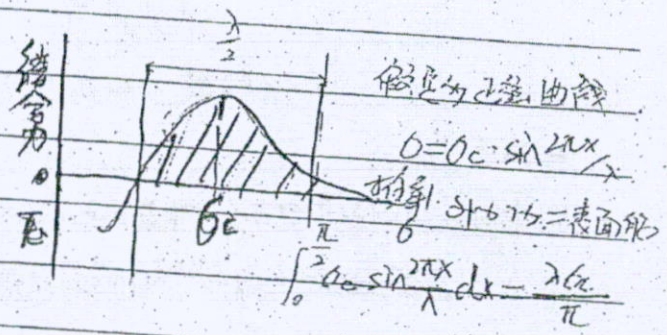
### §8.9 材料的断裂

一. 理论断裂强度  $\sigma_c$

完全脆性

无裂纹

理想弹性



$$\sigma_c = \left( \frac{E\gamma}{a} \right)^{1/2}$$

$$\therefore \frac{\lambda \sigma_c}{\pi} = 2\pi r^2$$

结果:  $r = 1.5 \text{ nm}$ ,  $a = 3 \times 10^{-8} \text{ cm}$

$$\sigma_c \approx \frac{E}{10}$$

$$\sigma_c = \frac{2\pi r^2}{\lambda}$$

推导 2:  $\sigma = \frac{E\epsilon}{\lambda}$ ,  $\sigma = E \cdot \frac{x}{a}$

$$\sin \frac{2\pi x}{\lambda} \approx \frac{2\pi x}{\lambda}$$

二. 实际断裂强度  $\sigma_f$

1.  $\sigma_f \ll \sigma_c$ ,  $\sigma_f \approx \frac{E}{1000}$

$$\sigma = \sigma_c \cdot \frac{2\pi x}{\lambda}$$

2. 原因: 裂纹

缺陷: 杂质、应力

应力集中

焊接裂纹

腐蚀

$$\sigma = E \frac{x}{a} = \sigma_c \cdot \frac{2\pi x}{\lambda}$$

$$\Rightarrow \sigma_c = \frac{E\lambda}{2\pi a} \quad (2)$$

由(1)(2)得:

$$\sigma_c = \left( \frac{E\gamma}{a} \right)^{1/2} \quad (3)$$

裂纹(Griffith)理论: 椭圆

① 薄片强度: 2a 裂纹



释放能量：弹性能  $V_E = -\frac{\sigma^2 \pi c^2}{E}$  (应力)

表面能： $V_s = 4\pi c$  (面积)

$$\Delta V = 2V_s + V_E = 4\pi c - \frac{\sigma^2 \pi c^2}{E}$$

$$\frac{d(\Delta V)}{dc} = 0 \Rightarrow 4\pi - \frac{2\sigma^2 \pi c}{E} = 0$$

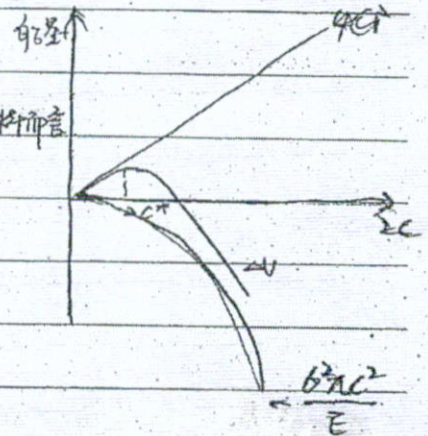
实际断裂强度： $\sigma_f = \left(\frac{2E\gamma}{\pi c}\right)^{1/2}$  对于完全脆性材料而言

如：玻璃

$\sigma_c < \sigma_f$  较轻

$$\frac{\pi c}{a} \gg a \Rightarrow \sigma_f \ll \sigma_c$$

(实际断裂强度  $\sigma_c$  远低于理论值的原因是裂纹)



#### 4. 塑性修正

对塑性材料： $\sigma_f = \left[ \frac{E(2\gamma + \gamma_p)}{\pi c} \right]^{1/2}$

§8-10 冷变形金属加热时的组织变化和性能变化

#### ★ 变化的三个阶段

回复阶段

再结晶阶段

晶粒长大阶段

显微组织无显著变化

通过再结晶核心形成长大，流线形状无变化，但尺寸变化

晶体缺陷(空位) 新等轴晶

亚结构 | 位错密度有所降低，位错密度↓，降低韧脆大点

无变化

54

性能：

强度有所下降

位错密度

强度比 降低韧脆大点

强度↓，塑性↑

塑性有所上升

位错密度

塑性↑ 提高韧脆大点

(晶粒长大的原因)

内应力完全消除

内应力完全消除

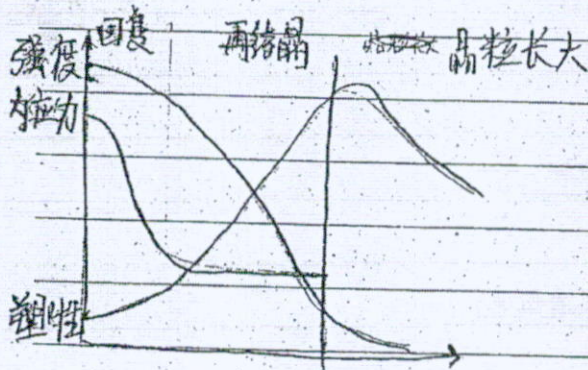
内应力明显下降



No. \_\_\_\_\_

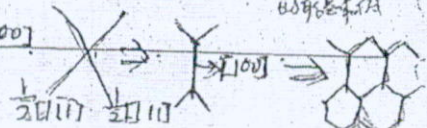
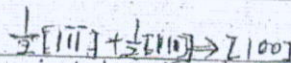
Date \_\_\_\_\_

弹性畸变能 ↓	弹性界面畸变能 ↓	
驱动力: 储能能 (位错 空位) 储能能		总界面能 ↓
应用实例: 去应力退火	再结晶退火	制备单晶



一 回复阶段:

回复机制	低温回复: 过空位湮灭 位错滑移	表面 界面 空位空位隙原子复合 形成位错环
	中温回复: 位错滑移 形成位错网络 (同一滑移面) 重新分布	
	高温回复: 形成亚晶 亚晶长大 位错反应	





No. 材料

Date 3.8-29

## 2. 回复动力学

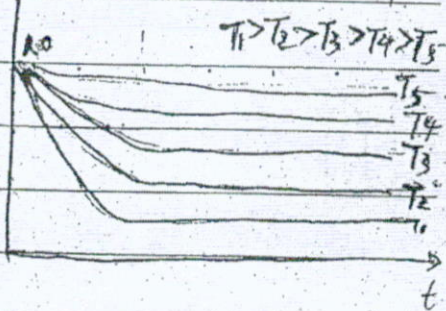
$$HR = \frac{C - C_0}{C_m - C_0}$$

$C_0$  — 完全退火  $C_0$

$C_m$  — 加工硬化  $C_m$

$C$  — 回复后  $C$

剩剩  
余余  
加工  
硬化  
部分  
的  
解  
HR



讨论: 1. 退火后初期 回复最快

✓

(2) 温度 ↑ → 回复越快

(3) 性能只有部分回复

(4) 回复到相同程度所需时间 ↑  $T \uparrow \rightarrow t \downarrow$

(5) 求回复时间:

在固定 HR:  $t = \text{常数} + \frac{C}{R} \frac{1}{T}$

$\hookrightarrow 1/t \propto \frac{1}{T}$

加工硬化完全消除, 性能恢复到退火后的状态.

## 二. 再结晶动力学 显微组织由大晶粒变为细小的晶粒.

1. 再结晶的形核 形核 + 核长大

(1) 再结晶核心 5. 基体结构 成核容易相变 不是相变.

在低密度下

形成于畸变高的位置 (晶界, 相界, 滑移带)

(2) 形核机制

晶界迁移机制 — 少量畸变晶粒

亚晶粒合并 — 大量畸变 高能量晶粒

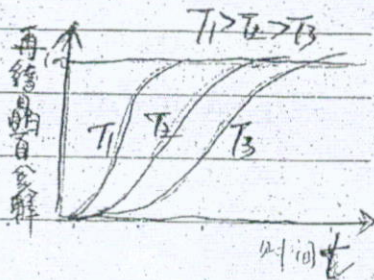
晶粒长大 — 大量畸变 低能量晶粒



## 2. 再结晶动力学

5. 形核

5. 形核

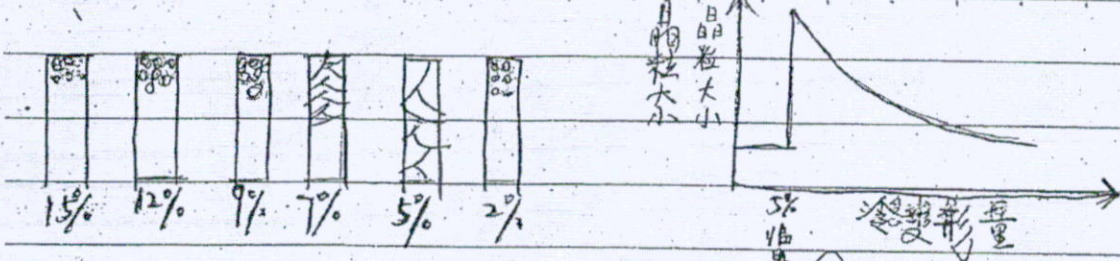




No. \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

### 3. 再结晶晶粒的长大



### 4. 再结晶温度 ( $T_R$ )

冷变形金属开始发生再结晶的最低温度

$$T_R = 0.4 T_m (K) \quad (T_m = 1538^\circ C \quad T_R = 451^\circ C)$$

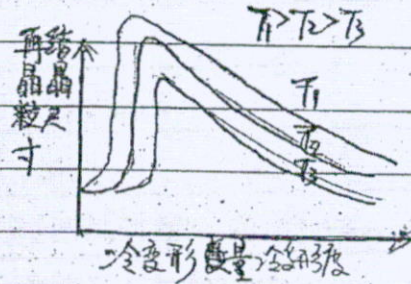
### ★ 影响再结晶的主要因素

1) 冷变形度  $\uparrow \rightarrow T_R \downarrow, R \downarrow$

2) 退火温度  $T \uparrow \rightarrow$  临界冷变形度  $\downarrow$

晶粒尺寸  $\uparrow$

再结晶速度  $\uparrow$



### 3) 原始晶粒尺寸

晶粒尺寸  $\downarrow \rightarrow T_R \downarrow$

(因为同样冷变形下, 尺寸小  $\rightarrow$  晶界多  $\rightarrow$  再结晶发生在晶界)

所以, 因此, 尺寸小  $\rightarrow T_R \downarrow$  越易再结晶

细化再结晶晶粒

### 4) 微量溶质原子

阻碍再结晶 阻碍再结晶晶粒长大  $T_R \uparrow, R \downarrow$

溶质 阻碍再结晶

(5) 第二相粒子: 如果第二相粒子大而稀  $\rightarrow$  促进再结晶 (主要促进再结晶核)  $\rightarrow$  促进

如果第二相粒子小而密  $\rightarrow$  阻碍位错运动  $\rightarrow$  阻碍形核

### 1) 再结晶晶粒长大

(指再结晶结束后晶粒的大小)

正常长大: 一次再结晶

异常长大: 二次再结晶

驱动力是晶界能 (再结晶长大是冷变形的储能能  $\rightarrow$  使高密度位错能变为低密度能)

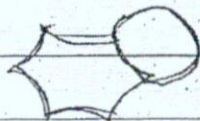
### 1. 晶粒不断长大

$\rightarrow$  1) 驱动力



2) 再结晶完成时的晶粒形状、大小不一 其不是形核长大而是原来的晶粒长大

形状：大 内凹 (保持120°角) 长大原因：平界面长大容易新阻碍 第二相粒子 再结晶阻碍



阻碍在某些区域消失

§8-11 金属的再结晶、高温中恢复及超塑性

3) 长大过程：大→大、小→小、自由界面迁移 金属的再结晶

4) 温度的影响：T↑→长大速率↑

5) 第二相影响：阻碍

再结晶温度以上的塑性变形

极限晶粒尺寸：
$$D_{min} = \frac{4r}{3\phi}$$

热变形：既有加工硬化，又有再结晶软化

r—第二相粒子半径； $\phi$ —第二相粒子体积

动态回复再结晶、静态回复再结晶

含碳量↑→阻碍作用增大→板极限 2. 组织变化：

晶粒尺寸减小

① 组织细化 3. 再结晶

应用举例：1) 铝锰合金：20°C轧制Ti

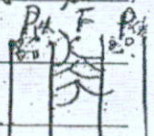
② 形成加工硬化→板极限



Ti—细化奥氏体晶粒  
因为A个金使物  
量下降，所以使  
减少其晶粒度

③ 形成带状组织 (希望其轻微)

P提高A3温度，使合金体系转变



3. 性能变化

2) 销售钢 (脱氧完全)

1. 强度、韧性↑ 样品是韧性

→ 本质细晶钢 (长大倾向小) 固溶

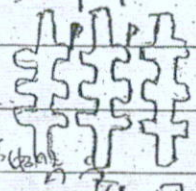
2) 各向异性，流线更合理 (如P)

用Al脱氧形成Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>氧化物而阻止

晶界迁移

二 金属的再结晶和晶粒长大

高温下变形和应力有关，应力作用时间有关



3) 过共析钢：加热到

A<sub>1</sub> 因为此时有未溶的Fe<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 作为第二

相粒子阻碍晶粒长大

大P与曲线在A<sub>1</sub>附近

相阻止晶粒长大

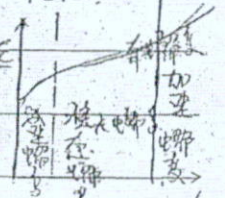
2. 曲线图：

3. 析发机制：析发机制

析发机制：析发机制

析发机制：析发机制

析发机制：析发机制



2. 异常晶粒长大——二次再结晶

析发机制：析发机制

析发机制：析发机制

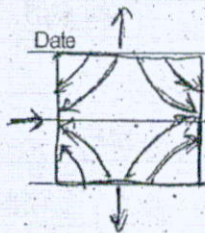
析发机制：析发机制

析发机制：析发机制



No.

Date



$$\alpha_p = \alpha_f + \alpha_m$$

打  
断  
形  
成  
过  
移  
形

4. 实现超塑性的条件

高温:  $0.5-0.65 T_m$

足够的  $\epsilon$  (通常  $> 100\%$ )

晶粒尺寸  $< 10 \mu m$

5. 超塑性:

FCC 和 BCC: BCC 超塑性在低温下更易实现

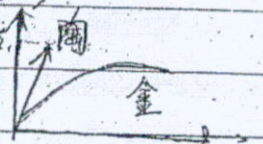
其本质是位错运动

解

§ 8-12. 金属晶体的变形

一. 变形特点

① 弹性模量高



2) 位错运动: 位错攀移

第一阶段: 位错滑移  $\rightarrow$  产生加工硬化

位错攀移  $\rightarrow$  高温回复  $\rightarrow$  性能  $\downarrow$

两个过程相等  $\rightarrow$  蠕变速率不变

三. 金属的超塑性

1. 超塑性: 极大的  $\epsilon$

2. 应变率敏感指数  $m$  与超塑性指数

关系

② 脆性断裂

③ 抗压强度大于抗拉强度 15 倍

④ 理论屈服强度很高, 实际断裂强度很低

$$\sigma = K \epsilon^m$$

$K$  — 常数

$\epsilon$  — 应变率

$m$  — 应变率敏感指数

2. 影响超塑性的因素

① 结合键很强  $\rightarrow$  弹性模量  $\uparrow$   $\rightarrow$  位错运动  $\downarrow$   
高  $\rightarrow$  屈服强度  $\uparrow$

由于屈服后的  $\epsilon$  较大, 当  $m$  较小时, 屈服后硬化

$\rightarrow P-N$  力大  $\rightarrow$  位错不易运动

屈服后硬化

② 位错稀少

一般  $m \sim 0.01-0.24$

③ 存在裂纹, 裂纹尖端的应力集中大

超塑性:  $m \sim 0.5$

$$\sigma_{max} = 20 \left( \frac{\sigma}{\rho} \right)^{1/2}$$

$\sigma_{max}$  — 最大应力

3. 超塑性变形的机理 — 扩散蠕变下的晶

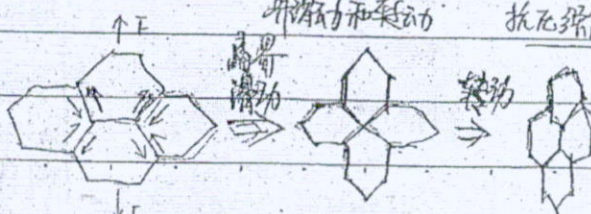
抗拉强度取决于  $\sigma_{max}$

抗压强度取决于  $\rho$

$\sigma$  — 名义应力

$\rho$  — 裂纹长度

$\rho$  — 裂纹尖端的半径



所以抗拉强度  $>$  抗压强度



# §8-13 高分子材料的变形

## 第九章. 固体材料的电子结构与物理性能

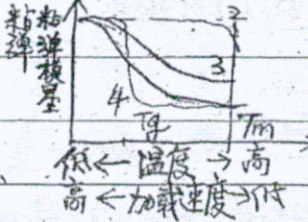
### 一. 热塑性塑料的变形

一个原子    2个原子    N个原子

1. 温度(加载速度)对变形特性的影响

35 —    —

$T < T_g$ : 刚性



29 —    —

$T > T_g$ : 粘弹性

25 —    —

$T$  再高: 橡胶态

15 —    —

$T > T_m$ : 熔融态

一. 能带结构: 有能级交叠 全裂

(加载速度影响和温度相同)

1. 玻璃化温度  
 $T_m \rightarrow$  熔点

能级  $\rightarrow$  原子-原子

能带: 对于N个原子的分裂, 交叠

- 1. 无定形线性高分子
- 2. 晶态
- 3. 高聚
- 4. 弹性体

### 二. 金属的能带结构及导电性

#### 1. 碱金属的能带结构及导电性

Li, Na, K, Rb, Cs

2. 冷变形特性: ①. 易结晶:  $T_g$  高的材料 由于外层能带一半满, 一半空, 则有较弱的导电性  
缺陷处: 空位向排列 1/30

#### 2. 贵金属的能带结构及导电性

②. 无定形  $T_g$  高的材料

Cu, Au, Ag

这——聚集空穴

导电性较好, 因为  $3d^{10}$  (内层电子) 是 5 核

空穴核心

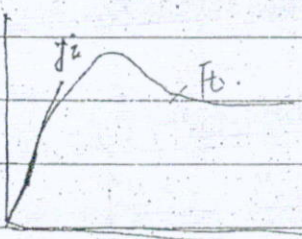
对作用力 强于 2p 及 4s 5s 原子核的作用力

### 二. 热固性材料的变形:

小于 35, 则 4s 易 1/30, 形成能级交叠, 导电性

硬. 脆

#### 3. 碱土金属 Mg



Be, Mg, Ca, Sr

最外层 s 能级已满, 但有能级交叠, 有较弱的导电性

#### 4. 过渡金属

Si, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Cu, Ni

内层未满 ( $Fe: 3d^6$ )

能带重叠 ( $Fe: 3d^6 4s^1$ ) 较差的导电性



No.

Date

导体  
绝缘

### 三费米能

费米能  $E_F$  —— 一定温度下电子占据能级的平均状态的概率

13. 对一般金属:  $E_F$  是价带和导带的分界线  
对于半导体:  $E_F$  在禁带的中央

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{RT}}}$$

1- 波尔兹曼常数

$$8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

$E_F$  — 费米能

### 四半导体和绝缘体

C, Si, Ge, Sn

$2s^2 2p^2$   $3s^2 3p^2$   $4s^2 4p^2$   $5s^2 5p^2$

s, p 轨道 形成 2 个  $sp^3$  杂化轨道

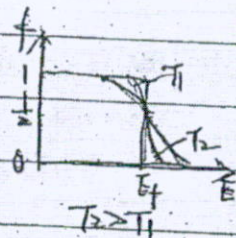
禁带宽度: 导带底 — 价带顶



五费米能 (T=0)

$E < E_F, f(E) = 1$

$E > E_F, f(E) = 0$



### §9-2 半导体

#### 2. 温度的影响

$E = E_F, f(E) = \frac{1}{2}$

$E < E_F, f(E) > \frac{1}{2}$

$E > E_F, f(E) < \frac{1}{2}$

一 本征半导体  $E_g$

1. 定义 — 不掺杂原子的纯净半导体

2. 半导体中的电子数与价带中空穴的数目相等

$$n_e = n_h$$

说明: 当 T=0 时, 电子由价带跃迁到导带, 在

导带中产生导电电子, 在价带中留下空穴 (相空穴)

存在于价带顶部, 导电电子存在于导带底部

$$n = n_e = n_h = N_c e^{-\frac{E_g}{2kT}} + N_v e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

$$= N_c e^{-\frac{E_g}{2kT}} + N_v e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

3.  $E_F$  位于禁带中央

$$\frac{E_g}{2} = E - E_F$$

$$n = 2 \left( \frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

#### 3. 费米能随温度

1)  $E_F$  随 T 的变化率基本为零

$E_F$  以上的能带基本为空带

一个未填充的能带一定在  $E_F$  附近

2) 电子和空穴的浓度在半导体中相等

7. 空穴浓度在价带顶部

电子浓度在导带底部

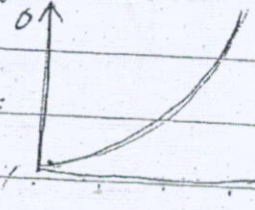
#### 4. 电子浓度对温度的依赖关系

$$n = N_c e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

$$= 2 \left( \frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

$$= N_c e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

$$\ln n = \ln N_c - \frac{E_g}{2kT}$$



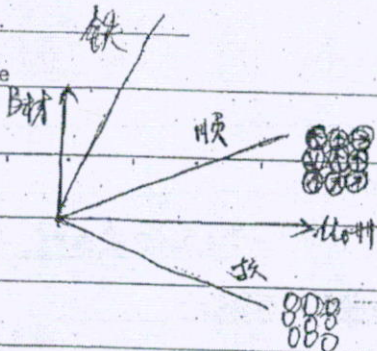






No.

Date



## 2. 磁畴结构

1) 铁磁材料是磁畴组成的

→ 一个磁畴相当于一个小磁体

易磁化方向: Fe [100] 6f

Ni [111] 8f

铁磁体 材料的内部磁矩大大加强

3. 外磁化

3) 解释磁化曲线

$M \gg M_0, T > 0$

Fe-Co-Ni-Gd

1) 朗德规则: 先同向填充再反向填充

2) 交换作用:  $E_i = -2AM_1M_2 \cos \psi$

交换积分:  $A = J \left( \frac{g}{r_{12}} \right)$

$A$  — 交换作用

$r_{12}$  — sd 层的半径

$M_1, M_2$  — 两个原子磁矩

$\cos \psi = M_1 \cdot M_2$

$E_i$  较小,  $\psi = 0 \Rightarrow A > 0$

同向平行

可逆磁化

不可逆磁化

磁能损失

4. 磁畴壁不可逆移动的原因: 1. 钉扎 2. 缺陷

硬磁材料 — 磁畴移动, 钉扎力大, 剩磁大

软磁材料 — 钉扎力小, 剩磁小

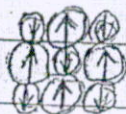
5. 铁磁体 — 铁磁性材料在顺磁性材料的基础上

Fe:  $770^\circ\text{C}$

Co:  $1131^\circ\text{C}$

Ni:  $358^\circ\text{C}$

5. 铁氧体 — 具有铁磁性的铁氧化物



内部的两种磁矩抵消后有

剩磁磁矩, 大大强于顺磁

39-4

— 铁磁体:  $B = \mu_0 H$

$= \mu_0 H$

1. 磁化与退磁

三. 磁化曲线与磁畴结构

a) 金属材料: 不透明

$E_g = 0$

任何光均可被吸收

1. B-H 曲线 (磁滞回线) P39

铁磁体 — 使剩磁完全消除的磁场

磁化

b) 绝缘材料:  $B < E_g$ , 透明

$B > E_g$ , 不透明



No. 材料43

Date

C 半导体, 本征半导体, 杂质半导体: 吸收  
KIR: 透射

绝缘材料: 吸收 (因为  $E_g$  小)

(3) 反射

金属中的自由电子吸收光子, 立即反射

绝缘体: 光子

三 材料的光学性质

1. 透明材料: 材料吸收光子能量, 其中的

光子以在可见光范围内吸收

光子吸收

2. 金属材料: 不透明

( $E_g = 0$ ,  $E$  很小,  $\lambda$  很大)

3. 半导体材料: 有  $E_g$

4. 绝缘体: 有  $E_g$ , 有价键  $E_g$

5. 光子: (1) 光子吸收

(2) 光子反射

$$2.71828 \times 10^0$$

$$= 2.718281828$$

$$0.000004 \times 2$$