

北京科技大学

814 材料科学基础

（强化课程内部讲义）

海文考研专业课教研中心
<http://a.wanxue.cn>

目录

第一部分 序言	3
第二部分 初试科目各章节知识点深度剖析	5
第一本书《材料科学基础》	5
第一章 原子的结构与键合	5
1.1 本章知识点串讲	5
1.2 本章重难点总结	6
1.3 本章典型题库	6
第二章 固体结构	6
2.1 本章知识点串讲	7
2.2 本章重难点总结	10
2.3 本章典型题库	13
第三章 晶体缺陷	14
3.1 本章知识点串讲	14
3.2 本章重难点总结	18
3.3 本章典型题库	20
第四章 固体中原子及分子的运动	21
4.1 本章知识点串讲	21
4.2 本章重难点总结	24
4.3 本章典型题库	25
第五章 材料的形变和再结晶	25
5.1 本章知识点串讲	26
5.2 本章重难点总结	30
5.3 本章典型题库	32
第六章 单组元相图及纯晶体的凝固	34
6.1 本章知识点串讲	34
6.2 本章重难点总结	36
6.3 本章典型题库	37
第七章 二元系相图和合金的凝固与制备原理	38
7.1 本章知识点串讲	38
7.2 本章重难点总结	39
7.3 本章典型题库	41
第八章 三元相图	42
8.1 本章知识点串讲	42
8.2 本章重难点总结	43
第九章 材料的亚稳态	43
9.1 本章知识点串讲	44
9.2 本章重难点总结	44
9.3 本章典型题库	46
第二本书《金属学》	46
第一章 金属及合金中的固态转变	47

1.1 本章知识点串讲	47
1.2 本章重难点总结	48
1.3 本章典型题库	49

海文考研

第一部分 序言

为了更好的发挥本强化课程讲义和配套的强化课程对专业课复习的指导作用，提高考研同学专业课的复习效率，请认真阅读以下三点说明：

一、非统考专业课命题的总体特征

统考专业课有教育部统一颁发的《考试大纲》，但非统考专业课教育部没有制定相应科目的考试大纲，是不是说非统考专业课的命题就没有可参考的官方权威依据了呢？不是，根据《教育部关于招收攻读硕士学位研究生统一入学考试初试自命题工作的指导意见（试行）》，该《指导意见》中对非统考专业课命题工作做了非常细致的要求，是我们解析非统考专业课命题原则的政策依据。

下面，我们解读其中和考研专业课命题和考试最为相关的内容，以飨考生。

《意见》中指出，专业课的考试内容“应结合大学本科和硕士研究生培养目标确定，以进入研究生学习必备的专业基础知识、基本理论和基本技能为考查重点，突出考查分析问题及解决问题的能力。各考试科目应涵盖三门以上本科阶段主干专业基础课程”。

由此可见，非统考专业课的考查范围既涉及学科的基础知识、基本理论和技能，更突出考查学生的分析问题及解决问题的能力。这样设计考试内容的目的，该《意见》中明确表明是为了“使本学科专业的优秀本科毕业生获得及格或及格以上的成绩”，也就是为了保证研究生选拔的质量。

因而，在试卷结构设计上，为了拉开区分度，试卷结构会按照学科专业特点，设计多种题型、一定比例的题量和不同层级的难度。对考生来说，需要明确知道该科目考试的题型种类、题量比例、各题型做题时间分配比例。此外，更为重要的，从学科知识点上来说，考生更需要掌握学科知识的基本点、重点、难点、高频考点，以及实际解决问题的综合能力。

二、如何高效发挥强化课程的指导作用

经过基础阶段专业课的学习，考生应该对考研的基本信息有了比较清楚的认识，更重要的是，考生对专业课各科目的原理、公式、概念等学科核心基础知识应该有了一定程度的记忆、理解和掌握。并且，也已经厘清学科各章节知识点之间的逻辑脉络，建立起了系统、整体性的学科结构和知识框架脉络。换言之，只有考生在趋近或部分超过该水平的状态下，强化课程才能发挥更好的指导作用。

如何最高效发挥强化课程的指导作用？这就需要考生明确的是，该强化课程、讲义和手头其他复习材料只能作为强化指导材料，核心研读的学习材料依旧是研招单位指定或默认的参考书、真题，只有通过多遍研读教材，结合强化课程的讲授，才能构建起完整的专业课知识体系，透彻理解专业课的内在知识逻辑结构，并在精细研究历年真题之后，对重要的知识点达到理解、记忆、掌握和应用，这样，才能真正达到

考研强化复习的目的，最终达到目标院校目标专业硕士研究生入学考试的水平和选拔标准。

三、强化课程授课内容与功能概述

承继专业课基础阶段的学习与逻辑，强化课程授课内容从总体上来说，是以历年真题和硕士点内部政策体现出来的专业课命题趋势、特点和考测逻辑为脉络，分级解析学科重点、难点和高频考点，并通过真题和典型题目详解使考生从重难点知识掌握到答题技巧得以全面强化，帮助考生高效构建应试系统框架和提升应试能力。

为达到以上功能，该强化课程首先对目标院校及目标专业的初试科目进行深度解析，梳理出有效复习与考核范围；第二，对考生在强化阶段专业课的复习提供了指导意见，结合公共课的复习状态，从专业课的学习内容到学习进程管理，都提出了合理的学习规划方案；第三，通过初试科目各章节知识点深度剖析、重难点总结和典型题练习，梳理出了学科相应的重点、难点、常考知识点，并通过配套练习，帮助考生全面构建、理解、掌握和运用专业课的知识体系和逻辑结构。第四，通过对真题的回顾、练习、比较、解析，以及将真题中考察的知识点回归至教材的分析中，我们可以得出真题的题型结构、题量比例、考查知识点出处、频次、考查知识点难度分级等对考生至关重要的复习备考指导信息。

第二部分 初试科目各章节知识点深度剖析

第一本书《材料科学基础》（胡赓祥、蔡珣、戎咏华，上海交通大学出版社，2010 年第三版）

本书的考查内容总计包括 9 个章节，其中重点章节是 2、3、4、5、6、7，材料基的复习必须踏踏实实尽可能掌握好每一个知识点。如果时间不够，就找重点看。如果个人找不到重点，应该首先仔细分析历年真题，因为历年真题常考的知识点就是本书的重点内容。总结完真题的知识点，要回归书本，将真题中的知识点充分挖掘其原形。最后再做真题，一定要将每一道题都弄清楚来龙去脉。也就是说，材料基的复习要经过真题——书本——真题的过程。

第一章 原子的结构与键合

本章节包括 1 个知识点，原子的键合，其中必须掌握的知识点是 1 个，原子键合，其余两个知识点基本不考察。

在复习过程中，首先要了解知识点，通过对教材的阅读，熟悉相应知识点，最后再通过本讲义如下内容对应的例题，从分析、解题、易错点到布置作业，完成相应知识点的掌握过程。

1.1 本章知识点串讲

【知识点 1】原子间的键合

1 金属键：自由电子与原子核间静电作用而产生的键合力。

原子结合：电子逸出共有，结合力较大，无方向性和饱和性；

金属晶体：导电性、导热性、延展性好，熔点较高。如金属。

2 离子键：当一正电性元素和一负电性元素相接触时，由于电子一得一失，使它们各自变成正离子和负离子，二者靠静电作用相互结合起来的化学键。

原子结合：电子转移，结合力大，无方向性和饱和性；

离子晶体：硬度高，脆性大，熔点高、导电性差。如氧化物陶瓷。

3 共价键：由两个或多个电负性相差不大的原子间通过共用电子对而形成的化学键。

原子结合：电子共用，结合力大，有方向性和饱和性；

原子晶体：强度高、硬度高（金刚石）、熔点高、脆性大、导电性差。如高分子材料。

4 范德华键：由瞬间偶极矩和诱导极矩产生的分子间引力所构成的物理键。

1.2 本章重难点总结

1.2.1 重难点知识点总结

金属键、离子键、共价键、范德华键的概念。

1.2.2 本章重难点例题讲解

【例题 1】简述原子间键合的种类及概念。

解析：1 金属键：自由电子与原子核间静电作用而产生的键合力。

2 离子键：当一正电性元素和一负电性元素相接触时，由于电子一得一失，使它们各自变成正离子和负离子，二者靠静电作用相互结合起来的化学键。

3 共价键：由两个或多个电负性相差不大的原子间通过共用电子对而形成的化学键。

4 范德华键：由瞬间偶极矩和诱导极矩产生的分子间引力所构成的物理键。

易错点：

1 键合的属性：物理键、化学键等。

2 各种键合定义的描述。

1.3 本章典型题库

1.3.1 作业

简述属于化学键的原子间的键合。

1.3.2 作业答案

离子键与共价键属于化学键的范畴。

离子键是指当一正电性元素和一负电性元素相接触时，由于电子一得一失，使它们各自变成正离子和负离子，二者靠静电作用相互结合起来。共价键是指由两个或多个电负性相差不大的原子间通过共用电子对而形成的化学键。

第二章 固体结构

本章节包括 10 个知识点，空间点阵及晶胞、晶向指数和晶面指数、晶体的对称性、典型金属晶体结构、晶体原子堆垛方式和间隙、多晶型性、固溶体、中间相、离子晶体的结构规则、典型离子晶体结构，

其中必须掌握的知识点为 10 个，即上述知识点均需要掌握。

在复习过程中，首先要了解知识点，通过对教材的阅读，熟悉相应知识点，最后再通过本讲义如下内容对应的例题，从分析、解题、易错点到布置作业，完成相应知识点的掌握过程。

2.1 本章知识点串讲

【知识点 1】空间点阵及晶胞

晶体是由结构单元在空间呈规则的三维周期排列而形成的。若把每个基元抽象为一个点，这些点具有完全相同的几何环境和物理环境，成为等同点。

由构成晶体的结构基元抽象出来的等同点在三维空间中的周期排列称为空间点阵。空间点阵中的各个点又叫做阵点。

空间点阵指几何点在三维空间作周期性的规则排列所形成的三维阵列，是人为的对晶体结构的抽象。为说明空间点阵，在点阵中取出一个具有代表性的空间单元作为点阵的组成，称为晶胞。

七种晶系及其分别的点阵参数关系：

- ①立方晶系： $a=b=c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$, (只有一个晶胞参数 a)
- ②四方晶系： $a=b \neq c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$, (有 2 个晶胞参数 a 和 c)
- ③六方晶系： $a=b \neq c, \alpha=\beta=90^\circ, \gamma=120^\circ$, (有 2 个晶胞参数 a 和 c)
- ④正交晶系： $a \neq b \neq c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ$, (有 3 个晶胞参数 a, b 和 c)
- ⑤单斜晶系： $a \neq b \neq c, \alpha=\gamma=90^\circ, \beta \neq 90^\circ$, (有 4 个晶胞参数 a, b, c 和 β)
- ⑥三斜晶系： $a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma$, (有 6 个晶胞参数 a, b, c, α, β 和 γ)
- ⑦菱方晶系： $a=b=c, \alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$, (有 2 个晶胞参数 a 和 α)

【知识点 2】晶向指数和晶面指数

1 晶向指数

(1) 以晶胞的某一阵点 O 为原点，过原点 O 的晶轴为坐标轴 x, y, z ，以晶胞点阵矢量的长度作为坐标轴的长度单位。

(2) 过原点 O 作一直线 OP ，使其平行于待定的晶向。

(3) 在直线 OP 上选取距原点 O 最近的一个阵点 P ，确定 P 点的 3 个坐标值。

(4) 将这 3 个坐标值化为最小整数 u, v, w ，加方括号， $[uvw]$ 即为待定晶向的晶向指数。

2 晶面指数

(1) 在点阵中同晶向指数方法设置参考坐标系，不能将坐标原点选在待确定指数晶面上，以免出现

零截距。

(2) 求得待定晶面在三个晶轴上截距，若晶面与某轴平行，则截距为正无穷；若晶面与某轴负轴相截，此轴截距为负值。

(3) 取各截距倒数。

(4) 将三个倒数化为互质的整数比，加圆括号，表示该晶面的指数。

3 六方晶面指数

取 a_1 、 a_2 、 c 为晶轴， a_1 、 a_2 轴夹角 120° ， c 与 a_1 、 a_2 垂直。

4 晶带

平行或相交于某一晶向直线的晶面构成一个晶带，此直线为晶带轴。

5 晶面间距

晶面指数不同可用晶面位向和晶面间距表示。

【知识点 3】晶体的对称性

1 对称元素

(1) 宏观对称元素

回转对称轴、对称面、对称中心、回转-反演轴。

(2) 微观对称元素

滑动面、螺旋轴。

【知识点 4】典型金属晶体结构

1 面心立方：点阵常数 a ；

2 体心立方：点阵常数 a ；

3 密排六方：点阵常数 a ， c 。

【知识点 5】晶体原子堆垛方式和间隙

1 密排方向

(1) 面心立方： $\{111\}\langle 110\rangle$

(2) 体心立方： $\{110\}\langle 111\rangle$

(3) 密排六方： $\{0001\}\langle 11\bar{2}0\rangle$

2 堆垛

(1) 密排六方结构：ABAB……

(2) 面心立方结构：ABCABC……

3 间隙

(1) 八面体间隙：位于 6 个原子所组成的八面体中间的间隙。

(2) 四面体间隙：位于 4 个原子所组成的四面体中间的间隙。

【知识点 6】多晶型性

有些固态金属在不同的温度和压力下具有不同的晶体结构，即具有多晶型性，转变的产物称为同素异构体。常伴随提及的突变。

【知识点 7】固溶体

1 特点：保持着原溶剂的晶体结构。

2 分类：

(1) 置换固溶体：晶体结构、原子尺寸因素、化学亲和力（电负性因素）、原子价因素

(2) 间隙固溶体

溶质原子分布于溶剂晶格间隙而形成的固溶体。

溶解度与溶质原子大小和溶剂晶体结构中间隙的形状和大小等因素有关。

3 性质

(1) 点阵常数改变

(2) 产生固溶强化

(3) 物理、化学性能的变化

【知识点 8】中间相

1 种类

化合物和以化合物为基的固溶体。

包括正常价化合物、电子价化合物、与原子尺寸因素有关的化合物。

2 原子间结合方式

原子键与其他典型键相混合的一种结合方式。

【知识点 9】离子晶体的结构规则

1 负离子配位多面体规则

在离子晶体中，正离子周围形成一个负离子配位多面体，正负离子间的平衡距离取决于正负离子半径之和，正离子的配位数取决于正负离子的半径比。

2 电价规则

一个负离子必定同时被一定数量的负离子配位多面体所共有。

3 负离子多面体公用顶、棱和面的规则

在配位结构中，共用棱特别是共用面的存在，会降低这个结构的稳定性。

4 不同种类正离子配位多面体间连接规则

5 节约规则

【知识点 10】典型离子晶体结构

1 AB 型化合物

CsCl 型结构、NaCl 型结构、立方 ZnS 结构、六方 ZnS 型结构

2 AB₂ 型结构

CaF₂ 型结构、TiO₂ 型结构、β-方石英型结构

3 A₂B₃ 型化合物结构

4 ABO₃ 型化合物结构

CaTiO₃ 型结构、CaCO₃ 型结构

5 AB₂O₄ 型化合物结构

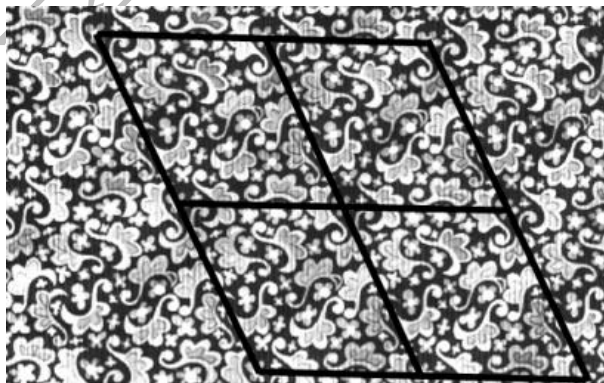
2.2 本章重难点总结

2.2.1 重难点知识点总结

空间点阵及晶胞、晶向指数和晶面指数、典型金属晶体结构、晶体原子堆垛方式和间隙。

2.2.2 本章重难点例题讲解

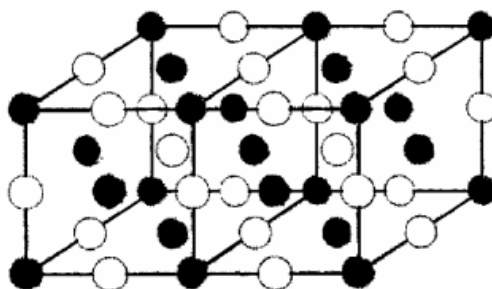
【例题 1】把下图的图案抽象出一个平面点阵。



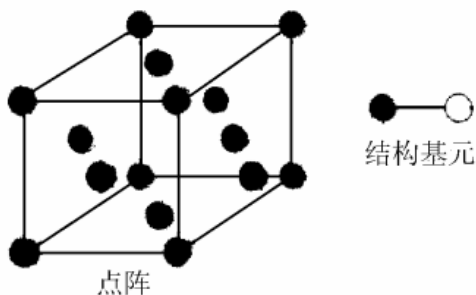
解析：按照等同点的原则，上图黑线勾画出的点阵就是由此图案抽象出的平面点阵。

易错点：未明确点阵的意义，未按照“等同点原则”进行勾画。

【例题 2】图 1-56 的晶体结构中包含两类原子，把这个晶体结构抽象出空间点阵，画出其中一个结构基元。



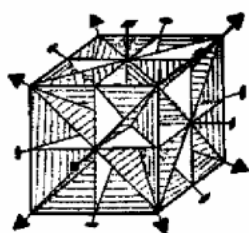
解析：上图的结构单元是由一个黑点和一个白点组成，按照等同点原则，抽象出的空间点阵如下图所示，它的布拉喇菲点阵是面心立方。



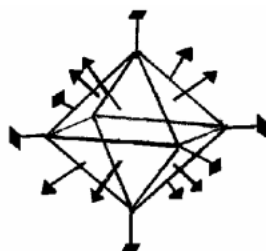
易错点：（1）不能正确确定结构单元、抽象出点阵。

（2）不明确布拉喇菲点阵的类型。

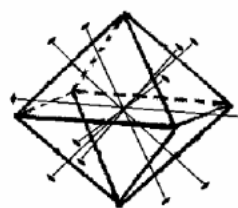
【例题 3】画出下图中各个形体所有的对称元素。其中 a) 是立方体，b) 是四面体，c) 是八面体，d) 是正六面柱体。



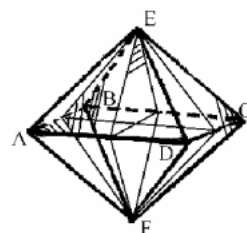
立方体



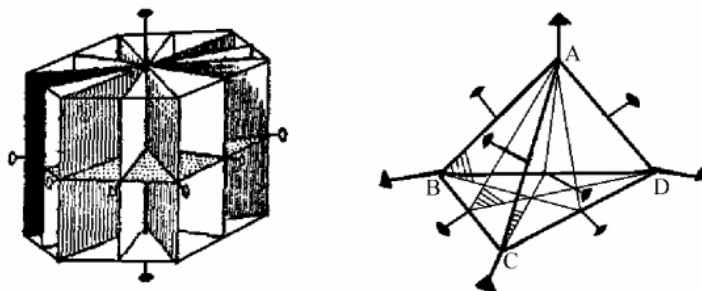
八面体的 C_3 和 C_4



八面体的 C_2



八面体的镜面



解析：立方体有 4 个 3 次轴，它们是 4 个体对角线，即过立方体中心的 3 个 $\langle 111 \rangle$ 方向；有 3 个 4 次轴，它们是立方体三对平行面的中点连线，即过立方体中心的 3 个 $\langle 100 \rangle$ 方向；有 6 个 2 次轴，它们是过立方体中心的 6 个 $\langle 110 \rangle$ 方向；有 9 个镜面，即过立方体中心的 3 个 $\{100\}$ 面和过立方体中心的 6 个 $\{110\}$ 面；有一个对称中心，它就是立方体的中心。立方体顶面和底面中心与过立方体中心并平行于顶面（和底面）的四边形四个顶点连接起来就是一个八面体，所以八面体的对称性质与立方体的相同。它有 4 个 3 次轴，3 个 4 次轴，见上图右 2 图；有 6 个 2 次轴，见上图的右 3 图；有 9 个镜面，上面最右边的图只画出了四个镜面，它们是过 E、F 点与 ABCD 四边形的两条中线连成的两个面以及 EAFC 面和 EBFC 面，按同样方法以 A、C 顶点和 B、D 顶点也可各得四个镜面，但是其中有一个是重复的，所以共有 9 个镜面；八面体中心是对称中心。

六面柱体有 1 个 6 次轴，它是过六面柱体中心并垂直顶面和底面的轴；有 6 个 2 次轴，它们是过六面柱体中心的六边形的三个对角线 and 这个六边形对边中点连线；有 7 个镜面，它们是过六面柱体中心的六边形面、六面柱体三对棱连成的三个面以及六面柱体三对柱面中线连成的三个面；有一个对称中心，它是六面柱体的中心。四面体有四个 3 次轴，它们是四个顶点与其对面的三角形中心的连线；有 3 个 2 次轴，它们是六条边两两中点的连线；有 6 个镜面，它们是每一个面（等边三角形）三条中线与这个面所对的顶角连成的三角形面，这样四个面共作出 12 个面，但它们有一半是重复的，所以共有 6 个镜面；四面体没有对称中心。

易错点：（1）未明确对称元素的意义；

（2）识记各种模型的对称元素。

【例题 4】空间点阵

解析：晶体是由结构单元在空间呈规则的三维周期排列而形成的。若把每个基元抽象为一个点，这些点具有完全相同的几何环境和物理环境，成为等同点。

由构成晶体的结构基元抽象出来的等同点在三维空间中的周期排列称为空间点阵。空间点阵中的各个点又叫做阵点。

空间点阵指几何点在三维空间作周期性的规则排列所形成的三维阵列，是人为的对晶体结构的抽

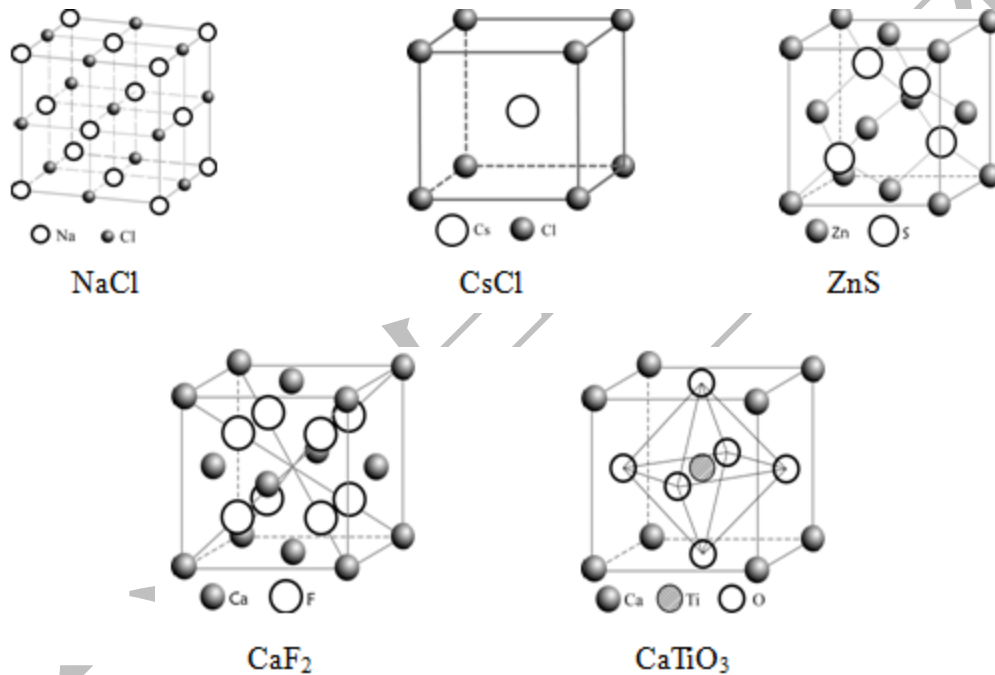
象。

易错点：明确空间点阵的意义及概念。

2.3 本章典型题库

2.3.1 作业

1 分别给出下列离子晶体的布拉菲点阵类型和下面晶胞中正、负离子的个数。(下图中的点阵参数均为 $a=b=c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$)



2 讨论晶体结构和空间点阵之间的关系。

3 简述影响原子半径的因素。

2.3.2 作业答案

1

离子晶体	布拉菲点阵类型	正离子个数	负离子个数
NaCl	面心立方 (fcc)	4	4
CsCl	简单立方	1	1
ZnS	面心立方 (fcc)	4	4
CaF ₂	面心立方 (fcc)	4	8
CaTiO ₃	简单立方	1+1	3

2 晶体结构指的是晶体内部原子实际的排列方式；空间点阵是在空间由点排列成的无限阵列，其中每一个点都和其他所有点具有相同的环境；两者之间的关系可用“空间点阵+基元=晶体结构”来描述。

空间点阵只有 14 种，基元可以是无穷多种，因而构成的具体的晶体结构也是无穷多种。

3 温度与应力；结合键的影响；配位数的影响（高配位结构向低配位结构转变时，体积膨胀，原子半径减小减缓体积变化；核外电子分布的影响（一周期内，随核外电子数增加至填满，原子半径减小至一最小值。

第三章 晶体缺陷

本章节包括 6 个知识点，点缺陷的形成、位错的基本类型、柏氏矢量、位错、堆垛层错、面缺陷，其中必须掌握的知识点为 6 个，即上述知识点均需要掌握。

在复习过程中，首先要了解知识点，通过对教材的阅读，熟悉相应知识点，最后再通过本讲义如下内容对应的例题，从分析、解题、易错点到布置作业，完成相应知识点的掌握过程。

3.1 本章知识点串讲

【知识点 1】点缺陷的形成

1 某一原子振幅增大，跳离原来位置，点阵中形成空节点，称为空位。

在三维空间各方向上尺寸都很小的缺陷称为点缺陷。如空位、间隙原子、异类原子等。

分类：

- (1) 肖特基缺陷
- (2) 弗伦克尔缺陷
- (3) 热平衡缺陷

2 点缺陷的平衡浓度

(1) 点缺陷是热力学平衡的缺陷—在一定温度下，晶体中总是存在着一定数量的点缺陷（空位），这时体系的能量最低—具有平衡点缺陷的晶体比理想晶体在热力学上更为稳定。（原因：晶体中形成点缺陷时，体系内能的增加将使自由能升高，但体系熵值也增加了，这一因素又使自由能降低。其结果是在 $G-n$ 曲线上出现了最低值，对应的 n 值即为平衡空位数。）

(2) 点缺陷的平衡浓度

$$C=A\exp(-\Delta E_v/kT)$$

【知识点 2】位错

位错：晶体中某处一列或若干列原子有规律的错排。

意义：（对材料的力学行为如塑性变形、强度、断裂等起着决定性的作用，对材料的扩散、相变

过程有较大影响。)

1 位错的基本类型

(1) 刃型位错

模型: 滑移面/半原子面/位错线 (位错线 \perp 晶体滑移方向, 位错线 \perp 位错运动方向, 晶体滑移方向//位错运动方向。)

分类: 正刃型位错 (\perp); 负刃型位错 (—)。

(2) 螺型位错

模型: 滑移面/位错线。(位错线//晶体滑移方向, 位错线 \perp 位错运动方向, 晶体滑移方向 \perp 位错运动方向。)

分类: 左螺型位错; 右螺型位错。

(3) 混合位错

模型: 滑移面/位错线。

2 位错的性质

(1) 形状: 不一定是直线, 位错及其畸变区是一条管道。

(2) 是已滑移区和未滑移区的边界。

(3) 不能中断于晶体内部。可在表面露头, 或终止于晶界和相界, 或与其它位错相交, 或自行封闭成环。

3 柏氏矢量

(1) 确定方法 (避开严重畸变区)

a 在位错周围沿着点阵结点形成封闭回路。

b 在理想晶体中按同样顺序作同样大小的回路。

c 在理想晶体中从终点到起点的矢量。

(2) 柏氏矢量的物理意义

a 代表位错, 并表示其特征 (强度、畸变量)。

b 表示晶体滑移的方向和大小。

c 柏氏矢量的守恒性 (唯一性): 一条位错线具有唯一的柏氏矢量。

d 判断位错的类型。

(3) 柏氏矢量的表示方法

a 表示: $\mathbf{b} = a/n[\mathbf{uvw}]$ (可以用矢量加法进行运算)。

b 求模: $|\mathbf{b}| = a/n[\mathbf{u}^2 + \mathbf{v}^2 + \mathbf{w}^2]^{1/2}$ 。

4 位错密度

(1) 表示方法: $\rho = K/V$

$$\rho = n/A$$

(2) 晶体强度与位错密度的关系 (τ - ρ 图)。

(3) 位错观察：浸蚀法、电镜法。

5 位错的应变能与线张力

(1) 单位长度位错的应变能： $W=\alpha Gb^2$ 。

($\alpha=0.5\sim 1.0$, 螺位错取下限, 刃位错取上限。)

(2) 位错是不平衡的缺陷。

(商增不能抵销应变能的增加。)

(3) 位错的线张力： $T=\alpha Gb^2$ 。

(4) 保持位错弯曲所需的切应力： $\tau=Gb/2r$ 。

6 位错的应力场及其与其它缺陷的作用

(1) 应力场

螺位错： $\tau=Gb/2\pi r$ 。(只有切应力分量。)

刃位错：

晶体中：滑移面以上受压应力，滑移面以下受拉应力。

滑移面：只有切应力。

(2) 位错与位错的交互作用

$f=tb$, $f=-\sigma b$ (刃位错)。

同号相互排斥, 异号相互吸引。(达到能量最低状态。)

(3) 位错与溶质原子的相互作用

间隙原子聚集于位错中心, 使体系处于低能态。

柯氏气团：溶质原子在位错线附近偏聚的现象。

(4) 位错与空位的交互作用导致位错攀移。

7 位错的增殖、塞积与交割

(1) 位错的增殖：F-R 源。

(2) 位错的塞积

分布：逐步分散。

位错受力：切应力作用在位错上的力、位错间的排斥力、障碍物的阻力。

(3) 位错的交割

位错交割后结果：按照对方位错柏氏矢量(变化方向和大小)。

割阶：位错交割后的台阶不位于它原来的滑移面上。

扭折

对性能影响：增加位错长度, 产生固定割阶。

8 位错反应

(1) 位错反应：位错的分解与合并。

(2) 反应条件

几何条件: $\sum b_{\text{前}} = \sum b_{\text{后}}$; 反应前后位错的柏氏矢量之和相等。

能量条件: $\sum b_{\text{前}}^2 > \sum b_{\text{后}}^2$; 反应后位错的总能量小于反应前位错的总能量。

9 实际晶体中的位错

(1) 全位错: 通常把柏氏矢量等于点阵矢量的位错称为全位错或单位位错。

(实际晶体中的典型全位错如表 1-7 所示)

(2) 不全位错: 柏氏矢量小于点阵矢量的位错。

(实际晶体中的典型不全位错如表 1-7 所示)

(3) 肖克莱和弗兰克不全位错。

肖克莱不全位错的形成: 原子运动导致局部错排, 错排区与完整晶格区的边界线即为肖克莱不全位错。(结合位错反应理解。可为刃型、螺型或混合型位错。)

弗兰克不全位错的形成: 在完整晶体中局部抽出或插入一层原子所形成。(只能攀移, 不能滑移。)

(4) 堆垛层错与扩展位错

堆垛层错: 晶体中原子堆垛次序中出现的层状错排。

扩展位错: 一对不全位错及中间夹的层错称之。

【知识点 3】柏氏矢量

- 1 反映位错周围点阵畸变总和的物理量
- 2 与回路起点及具体途径无关
- 3 一根位错线具有唯一的柏氏矢量
- 4 柏氏矢量之和恒为 0
- 5 位错的连续性

【知识点 4】位错的运动

(1) 位错的易动性。

(2) 位错运动的方式

a 滑移: 位错沿着滑移面的移动。

刃型位错的滑移: 具有唯一的滑移面

螺型位错的滑移: 具有多个滑移面。

位错环的滑移: 注重柏氏矢量的应用。

b 攀移: 刃型位错在垂直于滑移面方向上的运动。

机制: 原子面下端原子的扩散——位错随半原子面的上下移动而上下运动。

分类: 正攀移(原子面上移、空位加入)/负攀移(原子面下移、原子加入)。

应力的作用: (半原子面侧) 压应力有利于正攀移, 拉应力有利于负攀移。

(3) 作用在位错上的力(单位距离上)

滑移: $f = \tau_b$;

攀移: $f = \sigma_b$ 。

【知识点 5】堆垛层错

实际晶体结构中，密排面的正常堆垛顺序有可能遭到破坏和错排，如密排面{111}由 ABCABC 堆垛变为 ABCABABC……，成为堆垛层错，简称层错。

【知识点 6】面缺陷

面缺陷主要包括晶界、相界和表面，它们对材料的力学和物理化学性能具有重要影响。

1 晶界

(1) 晶界：两个空间位向不同的相邻晶粒之间的界面。

(2) 分类

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

小角度晶界：晶粒位向差小于 10 度的晶界。其结构为位错列，又分为对称倾侧晶界和扭转晶界。

亚晶界：位向差小于 1 度的亚晶粒之间的边界。为位错结构。

孪晶界：两块相邻孪晶的共晶面。分为共格孪晶界和非共格孪晶界。

2 相界

(1) 相界：相邻两个相之间的界面。

(2) 分类：共格、半共格和非共格相界。

3 表面

(1) 表面吸附：外来原子或气体分子在表面上富集的现象。

(2) 分类

物理吸附：由分子键力引起，无选择性，吸附热小，结合力小。

化学吸附：由化学键力引起，有选择性，吸附热大，结合力大。

4 界面特性

(1) 界面能会引起界面吸附。

(2) 界面上原子扩散速度较快。

(3) 对位错运动有阻碍作用。

(4) 易被氧化和腐蚀。

(5) 原子的混乱排列利于固态相变的形核。

3.2 本章重难点总结

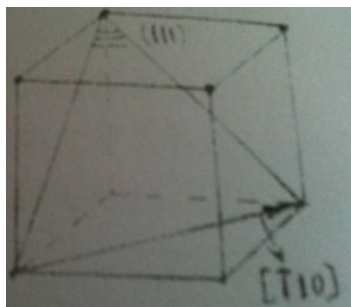
3.2.1 重难点知识点总结

点缺陷的形成，位错的形成、产生及类型，晶界及其相关知识。

3.2.2 本章重难点例题讲解

【例题 1】在面心立方结构的金属中 (111) 面上运动着柏氏矢量为 $b=a/2[\bar{1}10]$ 的位错，位错线方向也是 $[\bar{1}10]$ ，请在单胞中画出 (111) 晶面和 $[\bar{1}10]$ 晶向，并说明该位错属于什么类型。若该位错的运动受阻，请判断是否有可能转移到 $(\bar{1}11)$ 、 $(1\bar{1}1)$ 、 $(11\bar{1})$ 各晶面上继续运动？为什么？

解析：画出一个 FCC 单胞在 (111) 上画一条 $\langle 110 \rangle$ 直线即可（如下图）。



位错类型为螺型位错，因为位错线方向和柏氏矢量方向平行（右螺）。

位错运动受阻后，可能转移到 $(11\bar{1})$ 晶面继续运动，不能转移到 $(\bar{1}11)$ 、 $(1\bar{1}1)$ 上继续运动。因为对于螺型位错，包含位错线的晶面都可成为其滑移面，当其在滑移面受阻时，有可能转移到与之相交的另一滑移面继续运动，即交滑移。易知只有 $(11\bar{1})$ 包含位错线，则位错只可能转移到 $(11\bar{1})$ 面上去。

易错点：位错属于晶体缺陷的一种，主要分为刃型位错、螺型位错以及二者混合。刃型位错位错线与柏氏矢量垂直；螺型位错位错线与柏氏矢量平行。

交滑移只能从包含位错的几个滑移面之间发生。

【例题 2】说明面心立方结构的潜在滑移系有 12 个，体心立方结构的潜在滑移系有 48 个。

解析：面心立方晶体的滑移系有四个，每个 $\{111\}$ 面上有三个滑移方向，所以共有 12 个潜在滑移系。体心立方晶体的滑移系共有 6 个，每个 $\{110\}$ 面上有两个滑移方向，这种滑移系共有 12 个潜在滑移系； $\{211\}$ 面有 12 个，每个 $\{211\}$ 面上有 1 个滑移方向，这种滑移系共有 12 个潜在滑移系； $\{312\}$ 面共有 24 个，每个 $\{312\}$ 面上有 1 个滑移方向，这种滑移系共有潜在滑移系 24 个，这样，体心立方晶体的潜在滑移系共有 48 个。

易错点：明确滑移系的概念。

【例题 3】证明位错线不能终止在晶体内部。

解析：设有一位错 C 终止在晶体内部，如图所示，终点为 A。绕位错 C 作一柏氏回路 L_1 ，得柏氏矢量 b 。现把回路移动到 L_2 位置，按柏氏回路性质，柏氏回路在完整晶体中移动，它所得的柏氏矢量不

会改变，仍为 b 。但从另一角度看， L_2 内是完整晶体，它对应的柏氏矢量应为 0。这二者是矛盾的，所以这时不可能的。

易错点：对于位错概念的深入理解。

【例题 4】一个位错环能否各部分都是螺位错？能否各部分都是刃位错？为什么？

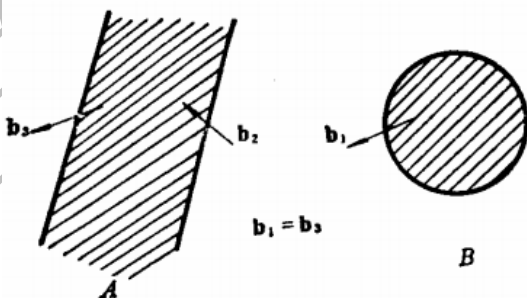
解析：螺位错的柏氏矢量与位错线平行，而一个位错只有一个柏氏矢量，一个位错环不可能与一个方向处处平行，所以一个位错环不能各部分都是螺位错。刃位错的柏氏矢量与位错线垂直，如果柏氏矢量垂直位错环所在的平面，则位错环处处都是刃位错。这种位错的滑移面是位错环与柏氏矢量方向组成的棱柱面，这种位错又称棱柱位错。

易错点：充分认识柏氏矢量的意义，利用柏氏矢量确定位错的存在。

3.3 本章典型题库

3.3.1 作业

- 1 讨论点缺陷与位错的交互作用及对位错运动的影响。这种交互作用在低碳钢应力-应变曲线和材料加工过程中会出现什么现象？有何防止方法？
- 2 图中 A 是面心立方结构中的扩展位错，B 是封闭的位错环，它的柏氏矢量和 A 左边的部分位错的相同。A 和 B 向左移动时，不改变其形状和尺寸，问位错扫过后滑移面两侧原子的移动方式是否相同？



3.3.2 作业答案

1 C、N 间隙溶质原子在位错附近与位错发生弹性交互作用形成柯垂尔气团，被柯垂尔气团钉扎的位错需要更大的应力使它们摆脱气团，出现上屈服点；挣脱气团后，位错运动比较容易，应力减小，形成下屈服点。开动位错产生塑性变形逐渐转移到其它未发生塑性变形的区域，产生不均匀变形带，即吕德斯带。

防止方法：去除 C、N 元素，形成 IF 钢；预变形使位错摆脱钉扎。

出现上下屈服现象的原因是 C、N 作为间隙溶质原子在位错形成柯垂尔气团，避免这一现象的方

法是采取预应变，变形量不超过下屈服点的应变量，此时位错摆脱钉扎，工件进入均匀变形阶段，再进行最终变形。

另一种方法：加入 V、Nb、Ti 等微量合金元素，将 C、N 固定在化合物中，形成无间隙原子钢，即 IF 钢。

2 A 扩展位错向左移动时，滑移面上下两侧原子相对跳动 b_3 然后跳动 b_2 ，即移动后滑移面两侧原子总跳动了 b_3+b_2 ；而 B 位错环向左移动时，滑移面上下两侧原子相对跳动 b_1 然后再跳动 $-b_1$ ，即位错环移动后滑移面两侧原子复原，好像没有发生跳动。

第四章 固体中原子及分子的运动

本章节包括 5 个知识点，菲克定律、化学扩散与自扩散、扩散的热力学分析、原子扩散理论（扩散机制）、影响扩散的因素，其中必须掌握的知识点为 5 个，即上述知识点均需要掌握。

在复习过程中，首先要了解知识点，通过对教材的阅读，熟悉相应知识点，最后再通过本讲义如下内容对应的例题，从分析、解题、易错点到布置作业，完成相应知识点的掌握过程。

4.1 本章知识点串讲

【知识点 1】菲克定律

1 菲克第一定律

(1) 第一定律描述：单位时间内通过垂直于扩散方向的某一单位面积截面的扩散物质流量（扩散通量 J ）与浓度梯度成正比。

(2) 表达式：

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

J ——扩散通量；

D ——扩散系数；

P ——扩散物质质量浓度。

(3) 适用条件：稳态扩散， $dc/dt=0$ 。浓度及浓度梯度不随时间改变。

2 菲克第二定律（扩散第二定律，普遍式）

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right)$$

$$(1) \text{ 表达式 } \begin{cases} \text{一般: } \partial C / \partial t = \partial (D \partial C / \partial x) / \partial x \\ \text{二维: } \begin{cases} \text{一般: } \partial C / \partial t = \partial (D \partial C / \partial x) / \partial x \\ \text{特殊: } \partial C / \partial t = D \partial^2 C / \partial x^2 \end{cases} \\ \text{三维: } \partial C / \partial t = D (\partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2) C \end{cases}$$

$$(2) \text{ 适用条件 } \begin{cases} \text{稳态扩散: } \partial C / \partial t = 0, \partial J / \partial x = 0。 \\ \text{非稳态扩散: } \partial C / \partial t \neq 0, \partial J / \partial x \neq 0 (\partial C / \partial t = -\partial J / \partial x)。 \end{cases}$$

(3) 应用

1) 误差函数解

适用条件: 无限长棒和半无限长棒。

表达式: $C = C_1 - (C_1 - C_2) \operatorname{erf}(x / 2 \sqrt{Dt})$ (半无限长棒)。

在渗碳条件下: $C: x, t$ 处的浓度; C_1 : 表面含碳量; C_2 : 钢的原始含碳量。

2) 正弦解

$$C_x = C_p - A_0 \sin(\pi x / \lambda)$$

C_p : 平均成分; A_0 : 振幅 $C_{\max} - C_p$; λ : 枝晶间距的一半。

对于均匀化退火, 若要求枝晶中心成分偏析振幅降低到 1/100, 则:

$$[C(\lambda/2, t) - C_p] / (C_{\max} - C_p) = \exp(-\pi^2 Dt / \lambda^2) = 1/100。$$

【知识点 2】化学扩散与自扩散

- 1 化学扩散: 扩散是由于浓度梯度引起的。
- 2 自扩散: 不依赖浓度梯度, 仅由热震动而产生的扩散。

【知识点 3】扩散的热力学分析

上坡扩散: 与一般的扩散方式不同, 扩散向着高浓度方向 (即和浓度梯度相同的方向) 而进行, 说明扩散驱动力不是浓度梯度而是化学位梯度。如 Si 在碳钢中的扩散。

$$F = -\partial \mu_i / \partial x$$

$$D = kT B_i \partial \ln a_i / \partial \ln x_i = kT B_i (1 + \partial \ln r_i / \partial \ln x_i)$$

【知识点 4】原子扩散理论 (扩散机制)

- 1 交换机制
- 2 间隙机制
- 3 空位机制
- 4 晶界扩散及表面扩散

关系图:

- (1) 间隙机制 { 间隙—间隙;
平衡位置—间隙—间隙: 较困难;
间隙—篡位—结点位置。

(间隙固溶体中间隙原子的扩散机制。)

- (2) 空位机制 { 方式: 原子跃迁到与之相邻的空位;
条件: 原子近旁存在空位。

(金属和置换固溶体中原子的扩散。)

- (3) 换位机制 { 直接换位
环形换位

(所需能量较高。)

【知识点 5】影响扩散的因素

1 温度

$$D=D_0\exp(-Q/RT)$$

可以看出, 温度越高, 扩散系数越大。

2 原子键力和晶体结构

原子键力越强, 扩散激活能越高; 致密度低的结构中扩散系数大 (举例: 渗碳选择在奥氏体区进行); 在对称性低的结构中, 可出现明显的扩散各向异性。

3 固溶体类型和组元浓度的影响

间隙扩散机制的扩散激活能低于置换型扩散; 提高组元浓度可提高扩散系数。

4 晶体缺陷的影响

(缺陷能量较高, 扩散激活能小)

空位是空位扩散机制的必要条件;

位错是空位管道, 低温下对扩散起重要促进作用;

界面扩散—(短路扩散): 原子界面处的快速扩散。

如对银: $Q_{\text{表面}}=Q_{\text{晶界}}/2=Q_{\text{晶内}}/3$

5 第三组元的影响

如在钢中加入合金元素对碳在 γ 中扩散的影响。

强碳化物形成元素, 如 W, Mo, Cr, 与碳亲和力大, 能显著组织碳的扩散;

弱碳化物形成元素, 如 Mn, 对碳的扩散影响不大;

固溶元素, 如 Co, Ni, 提高碳的扩散系数; Si 降低碳的扩散系数。

6 应力作用

4.2 本章重难点总结

4.2.1 重难点知识点总结

菲克定律、扩散机制、影响扩散的因素。

4.2.2 本章重难点例题讲解

【例题 1】 一块厚度为 d 的薄板，在 T_1 温度下两侧的浓度分别为 w_1, w_0 ($w_1 > w_0$)，当扩散达到平稳态后，给出①扩散系数为常数，②扩散系数随浓度增加而增加，③扩散系数随浓度增加而减小等三种情况下浓度分布示意图。并求出①种情况板中部的浓度。

$$D \frac{dC}{dx} = \text{常数}$$

解析：一维扩散的平稳态有

扩散系数为常数时， dC/dx 也应为常数，故浓度分布是直线。

扩散系数随浓度增加而增加时， dC/dx 应随浓度增加而减小，浓度分布曲线是上凸的曲线。

扩散系数随浓度增加而减小时， dC/dx 应随浓度增加而增加，浓度分布曲线是下凹的曲线。

易错点：正确掌握一维扩散的性质。

【例题 2】 计算 $x(\text{Ni})=0.4$ 以及 $x(\text{Ni})=0.6$ 两种合金在 900°C 时的互扩散系数。

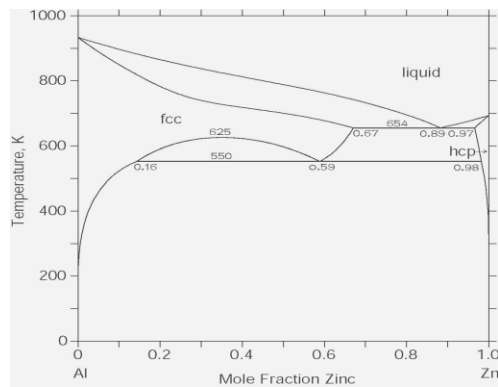
x_{Ni}	ϕ	$D_{\text{Ni}^*}^{\text{Au-Ni}}$	$D_{\text{Au}^*}^{\text{Au-Ni}}$
0.4	0.4	8.8×10^{-14}	10^{-13}
0.6	0.24	2.45×10^{-14}	4.08×10^{-14}

解析：上述数据代入 $\tilde{D} = (x_A D_{B^*}^{AB} + x_B D_{A^*}^{AB}) \phi$ ，得

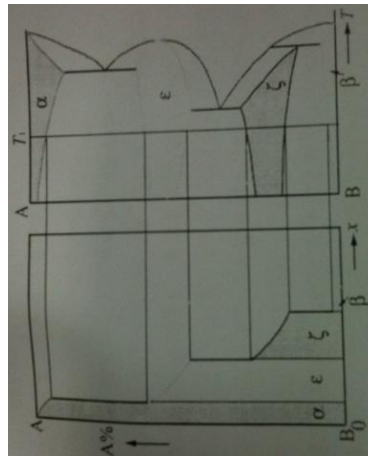
$$\tilde{D}_{\text{Ni}=0.4} = 3.7 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad \tilde{D}_{\text{Ni}=0.6} = 7.82 \times 10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

易错点：数据的正确选择。

【例题 3】 根据下面的 Al-Zn 相图，将纯 Al 和 Zn 形成扩散偶，在 600K 长时间保温，示意画出扩散层中 $x(\text{Zn})$ 随扩散距离 d 的变化曲线及相应出现的物相。



解析： 主要考察 Al-Zn 扩散偶在一定温度下保温，扩散层中的元素扩散情况。



易错点： 结合实际情况，根据相图进行扩散的分析。

4.3 本章典型题库

4.3.1 作业

1 上坡扩散

4.3.2 作业答案

1 溶质原子从低浓度向高浓度扩散的过程。

表明扩散的驱动力是化学梯度而非浓度梯度。

第五章 材料的形变和再结晶

本章节包括 9 个知识点，单晶体的塑性变形、多晶体塑性变形影响因素、合金的塑性变形、塑性变形对材料组织的影响、冷变形金属加热时组织与性能变化、回复机制、再结晶、晶粒长大影响因素、动态再结晶，其中必须掌握的知识点为 9 个，即上述知识点均需要掌握。

在复习过程中，首先要了解知识点，通过对教材的阅读，熟悉相应知识点，最后再通过本讲义如下内容对应的例题，从分析、解题、易错点到布置作业，完成相应知识点的掌握过程。

5.1 本章知识点串讲

【知识点 1】单晶体的塑性变形

1 滑移

(1) 滑移：在切应力作用下，晶体的一部分相对于另一部分沿着一定的晶面（滑移面）和晶向（滑移方向）产生相对位移，且不破坏晶体内部原子排列规律性的塑变方式。

(2) 滑移的表象学

- 光镜下：滑移带（无重现性）。
- 电镜下：滑移线。

(3) 滑移的晶体学

1) 几何要素

- 滑移面（密排面）
- 滑移方向（密排方向）

2) 滑移系

滑移系：一个滑移面和该面上一个滑移方向的组合。

滑移系的个数：(滑移面个数) × (每个面上所具有的滑移方向的个数)

典型滑移系

晶体结构	滑移面	滑移方向	滑移系数目	常见金属
面心立方	{111} × 4	<110> × 3	12	Cu, Al, Ni, Au
	{110} × 6	× 2	12	Fe, W, Mo
体心立方	{121} × 12	<111> × 1	12	Fe, W
	{123} × 24	× 1	24	Fe
密排六方	{0001} × 1	× 3	3	Mg, Zn, Ti
	{1010}	<1120>	3	Mg, Zr, Ti
	{1011}		6	Mg, Ti

滑移系数目与材料塑性的关系

- 一般滑移系越多，塑性越好；
- 与滑移面密排程度和滑移方向个数有关；
- 与同时开动滑移系数目有关 (τ_c)。

3) 滑移的临界分切应力 (τ_c)

τ_c : 在滑移面上沿滑移方向开始滑移的最小分切应力。

外力在滑移方向上的分解。

τ_c 取决于金属的本性, 不受 φ , λ 的影响;

$$\tau_c = \sigma_s \cos \varphi \cos \lambda \begin{cases} \varphi \text{ 或 } \lambda = 90^\circ \text{ 时, } \sigma_s \rightarrow \infty; \rightarrow \\ \sigma_s \text{ 的取值 } \varphi, \lambda = 45^\circ \text{ 时, } \sigma_s \text{ 最小, 晶体易滑移;} \\ \text{取向因子: } \cos \varphi \cos \lambda \begin{cases} \text{软取向: 值大;} \\ \text{硬取向: 值小。} \end{cases} \end{cases}$$

4) 位错运动的阻力

派-纳力: $\tau_{P-N} = [2\pi G / (1-\nu)] \exp\{-2\pi a / [(1-\nu)b]\}$

主要取决于位错宽度、结合键本性和晶体结构。

(4) 滑移时晶体的转动

1) 位向和晶面的变化 { 拉伸时, 滑移面和滑移方向趋于平行于力轴方向
(力轴方向不变) { 压缩时, 晶面逐渐趋于垂直于压力轴线。

2) 取向因子的变化 { 几何硬化: φ, λ 远离 45° , 滑移变得困难;
几何软化: φ, λ 接近 45° , 滑移变得容易。

(5) 多滑移

1) 滑移的分类 { 多滑移: 在多个 (>2) 滑移系上同时或交替进行的滑移。
双滑移:
单滑移:

2) 等效滑移系: 各滑移系的滑移面和滑移方向与力轴夹角分别相等的一组滑移系。

(6) 交滑移

1) 交滑移: 晶体在两个或多个不同滑移面上沿同一滑移方向进行的滑移。

2) 机制 { 螺位错的交滑移: 螺位错从一个滑移面转移到与之相交的另一滑移面的过程;
螺位错的双交滑移: 交滑移后的螺位错再转回到原滑移面的过程。

3) 滑移的表面痕迹 { 单滑移: 单一方向的滑移带;
多滑移: 相互交叉的滑移带;
交滑移: 波纹状的滑移带。

2 孪生

(1) 孪生: 在切应力作用下, 晶体的一部分相对于另一部分沿一定的晶面和晶向发生均匀切变并形成晶体取向的镜面对称关系。

(2) 孪生的晶体学	孪生面	$A1\{111\}, A2\{112\}, A3\{1012\}$
	孪生方向	$A1<112>, A2<\bar{1}11>, A3<1011>$
	孪晶区	

(3) 孪生变形的特点

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

3 扭折

协调变形，引起应力松弛，使晶体不致断裂。

【知识点 2】多晶体塑性变形影响因素

1 晶粒取向

2 晶界

【知识点 3】合金的塑性变形

1 单相固溶体合金

(1) 固溶强化

(2) 屈服现象与应变时效

2 多相合金的塑性变形

(1) 聚合型合金

(2) 弥散分布型合金

【知识点 4】塑性变形对材料组织的影响

1 对组织结构的影响

- (1) 形成纤维组织
 - 晶粒拉长
 - 杂质呈细带状或链状分布
- (2) 形成形变组织
 - 1) 形变组织: 多晶体材料由塑性变形导致的各晶粒呈择优取向的组织。
 - 2) 常见类型
 - 丝织构: 某一晶向趋于与拔丝方向平行。(拉拔时形成)
 - 板织构: 某晶面趋于平行于轧制面, 某晶向趋于平行于主变形方向。(轧制时形成)
 - 力学性能: 利: 深冲板材变形控制; 弊: 制耳。
- 3) 对性能的影响: 各向异性

物理性能: 硅钢片<100>织构可减少铁损。

(3) 形成位错胞

变形量 \uparrow → 位错缠结 → 位错胞 (大量位错缠结在胞壁, 胞内位错密度低。)

2 对性能的影响

(1) 对力学性能的影响 (加工硬化)

1) 加工硬化 (形变强化、冷作强化): 随变形量的增加, 材料的强度、硬度升高而塑韧性下降的现象。

- 2) 利弊
 - 利
 - 强化金属的重要途径;
 - 提高材料使用安全性;
 - 材料加工成型的保证。
 - 弊
 - 变形阻力提高, 动力消耗增大;
 - 脆断危险性提高。

(2) 对物理、化学性能的影响

导电率、导磁率下降, 比重、热导率下降;

结构缺陷增多, 扩散加快;

化学活性提高, 腐蚀加快。

(3) 残余应力 (约占变形功的 10%)

- 1) 分类
 - 第一类残余应力 (σ_I): 宏观内应力, 由整个物体变形不均匀引起。
 - 第二类残余应力 (σ_{II}): 微观内应力, 由晶粒变形不均匀引起。
 - 第三类残余应力 (σ_{III}): 点阵畸变, 由位错、空位等引起。80-90%。
- 2) 利弊
 - 利: 预应力处理, 如汽车板簧的生产。
 - 弊: 引起变形、开裂, 如黄铜弹壳的腐蚀开裂。

3) 消除: 去应力退火。

【知识点 5】冷变形金属加热时组织与性能变化

1 回复、再结晶、晶粒长大

2 性能变化

【知识点 6】回复机制

1 低温回复

2 中温回复

3 高温回复

【知识点 7】再结晶

形核—长大; 再结晶动力学

影响因素:

1 变形程度

2 原始晶粒尺寸

3 微量溶质原子

4 第二相粒子

5 再结晶退火工艺参数

【知识点 8】晶粒长大影响因素

1 温度

2 分散相粒子

3 晶粒间位相差

4 杂质与微量合金元素

【知识点 9】动态再结晶

1 微应变加工硬化阶段

2 动态再结晶开始阶段

3 稳态流变阶段

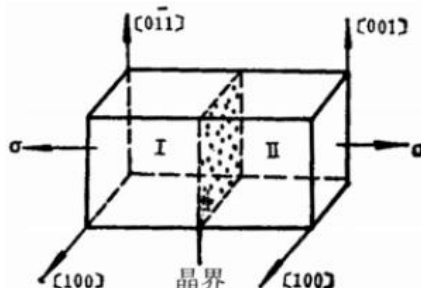
5.2 本章重难点总结

5.2.1 重难点知识点总结

单晶体塑性变形、回复机制、再结晶、晶粒长大影响因素、动态再结晶。

5.2.2 本章重难点例题讲解

【例题 1】 一个简单立方晶系的双晶，它们滑移系为 $\{100\}\langle 100\rangle$ ，双晶体的取向及力轴取向如下图所示，问哪一个晶体首先滑移？在哪个滑移系滑移？

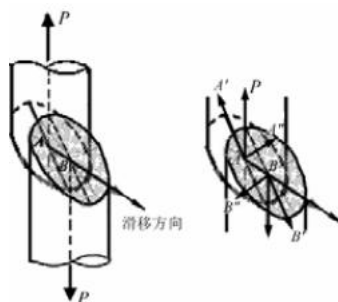


解析：简单立方晶系的滑移系是 $\{100\}\langle 100\rangle$ 。从图可知，对于 II 晶体，拉伸应力垂直于 $[001]$ 与 $[100]$ 共面的 (010) 面，即拉伸方向是 $[010]$ 。 $[010]$ 方向不是与 $\{100\}$ 面平行就是与 $\{100\}$ 面垂直，所以这个方向上的拉伸应力在任何一个滑移系上的分切应力都为 0，II 晶体不能滑移。对于 I 晶体，拉伸应力垂直于 $[100]$ 与 $[101]$ 共面的 (011) 面，即拉伸方向是 $[011]$ 。 $[011]$ 与 (100) 面垂直，故在以 (100) 为滑移系的滑移系上的分切应力为 0，它们不能开动； $[011]$ 又与 (010) 面平行，故在以 (010) 为滑移系的滑移系上的分切应力为 0，它们也不能开动；这样，拉伸轴为 $[011]$ 时只有 $(010)[001]$ 和 $(001)[010]$ 两个滑移系上的分切应力不为 0。由于 $[011]$ 轴与这两个滑移系的几何关系等效，故分切应力相等。在拉伸应力足够大时，可以在这两个滑移系开动。

易错点：滑移变形的特征及应用。

【例题 2】 分析单晶体拉伸时所发生的转动方向，说明原因。

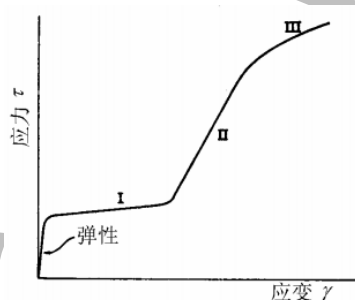
解析：设一个圆柱体两端受拉伸力，拉伸时，滑移面两侧晶体相对于滑移方向滑动，这样，滑移面两侧的力轴错开不再在一直线上，上下力轴错开了如右图中的 AB 距离。滑移面上下面的力在滑移面的法线方向的分力分别为 AA' 和 BB' ，他们构成一对力偶，使滑移面向平行轴向的方向转动。滑移面上下面的力在滑移面上的分力分别为 AA'' 和 BB'' ，他们也构成一对力偶，使滑移方向向滑移面椭圆截面的长轴方向转动。上述的两种转动综合的结果是使滑移方向向力轴方向转动。



易错点：单晶体塑性变形的具体应用。

【例题 3】 示意画出单晶的应力- 应变 ($\tau - \gamma$) 曲线, 并表出各阶段。铝 (层错能约为 200mJ/m^2) 和不锈钢 (层错能约为 10mJ/m^2) 哪一种材料形变第 III 阶段开始得更早? 这两种材料滑移特征有什么区别?

解析：



右图是单晶的应力- 应变 ($\tau - \gamma$) 曲线的示意图。

第 III 阶段是动态回复阶段, 主要的机制是在塞积群中的螺位错交滑移, 使得塞积群前的应力集中得以松弛, 从而使硬化率下降。所以越容易交滑移的材料第 III 阶段开始越早。铝的层错能很高, 位错一般不能扩展, 所以其螺位错容易交滑移; 而不锈钢的层错能很低, 位错通常都会扩展, 所以螺位错不容易交滑移。所以铝在受力时更早进入第 III 阶段。

易错点：塑性变形三个阶段的具体情况分析。

5.3 本章典型题库

5.3.1 作业

- 1 简述临界分切应力的概念。
- 2 给出再结晶温度的定义。

3 一个多晶体试样经变形后，在再结晶温度以上退火，请画出位错密度、晶粒（不包括亚晶）平均尺寸、强度、塑性以及电阻率随退火时间变化的示意图（把各种变化分别画一个图，注意它们的对应关系），并对其作出简单说明。

5.3.2 作业答案

1 临界分切应力是使单晶体中的滑移系启动的分切应力值。在滑移面的滑移方向上，只有当分切应力值达到或者超过某一特定的大小以后，沿这一滑移系才能开始滑移。

2 形变金属在一定时间内刚好完成再结晶的最低温度。属于动力学概念。（再结晶温度、再结晶时间）

3

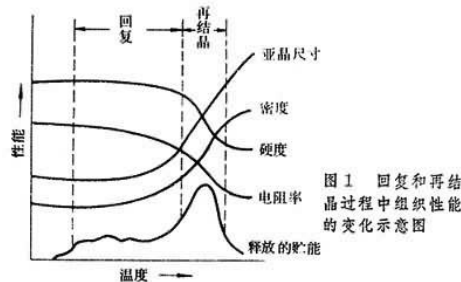


图1 回复和再结晶过程中组织性能的变化示意图

随退火温度的升高或退火时间的延长，形变组织中的位错缠结，演变为亚晶，亚晶进行合并并长大；在形变不均匀区内发生再结晶形核及长大，无位错的等轴再结晶晶粒取代长条状高位错密度的形变晶粒；随后是晶粒正常长大；储存能逐渐释放，特别是再结晶阶段释放的最显著。

性能变化：

硬度、强度：回复阶段的硬度变化很小，约占总变化的 20%，再结晶阶段硬度和强度下降较多。主要是与金属中的位错机制有关：回复阶段变形金属仍保持很高的位错密度；发生再结晶后，由于位错密度显著降低，硬度与强度显著降低。

电阻：变形金属的电阻在回复阶段已表现出明显的下降趋势。因为电阻率与晶体点阵中的点缺陷（空位、间隙原子等）密切相关。点缺陷引起的点阵畸变使传导电子发生散射，提高电阻率。故回复阶段由于点缺陷密度明显减少而导致电阻率明显下降。

内应力：回复阶段，宏观内应力可基本消除；再结晶阶段可消除全部微观内应力。

亚晶粒尺寸：回复前期变化不大；回复后期，尤其接近再结晶时，显著增大。

密度：再结晶阶段发生急剧升高，主要原因是再结晶中位错密度显著降低，此外，前期点缺陷数目减小。

储能释放：当冷变形金属加热到足以引起应力松弛的温度时，储能会得到释放。回复阶段各材料释放储能均较小，再结晶晶粒出现的温度对应于储能释放曲线的高峰处。

第六章 单组元相图及纯晶体的凝固

本章节包括 5 个知识点，相平衡条件和相律、单元系相图、纯晶体凝固、晶体长大、纯晶体凝固时生长形态，其中必须掌握的知识点为 5 个，即上述知识点均需要掌握。

在复习过程中，首先要了解知识点，通过对教材的阅读，熟悉相应知识点，最后再通过本讲义如下内容对应的例题，从分析、解题、易错点到布置作业，完成相应知识点的掌握过程。

6.1 本章知识点串讲

【知识点 1】相平衡条件和相律

$$f=C-P+n$$

f ——体系自由度

C ——体系组元数

P ——相数

n ——影响的条件

【知识点 2】单元系相图

$$f=3-P$$

【知识点 3】纯晶体凝固

1 液态结构——结构起伏

2 晶体凝固热力学条件——过冷度

1) 过冷：液态材料在理论结晶温度以下仍保持液态的现象。

2) 过冷度：液体材料的理论结晶温度(T_m) 与其实温度之差。

$$\Delta T = T_m - T \quad (\text{见冷却曲线})$$

过冷是凝固的必要条件（凝固过程总是在一定的过冷度下进行）。

3 形核

均匀形核：新相晶核在遍及母相的整个体积内无轨则均匀形成。

非均匀形核：新相晶核依附于其它物质择优形成。

(1) 均匀形核

1) 晶胚形成时的能量变化

$$\begin{aligned} \Delta G &= V \Delta G_v + \sigma S \\ &= (4/3) \pi r^3 \Delta G_v + 4 \pi r^2 \sigma \quad (\text{图 3-8}) \end{aligned}$$

2) 临界晶核

$$d\Delta G/dr=0$$

$$r_k = -2\sigma / \Delta G_v$$

临界晶核：半径为 r_k 的晶胚。

3) 临界过冷度

$$r_k = -2\sigma T_m / L_m \Delta T$$

临界过冷度：形成临界晶核时的过冷度。 ΔT_k 。

$\Delta T \geq \Delta T_k$ 是结晶的必要条件。

4) 形核功与能量起伏

$$\Delta G_k = S_k \sigma / 3$$

临界形核功：形成临界晶核时需额外对形核所做的功。

能量起伏：系统中微小区域的能量偏离平均能量水平而高低不一的现象。（是结晶的必要条件之三）。

5) 形核率与过冷度的关系

$$N = N_1 \cdot N_2$$

由于 N 受 N_1, N_2 两个因素控制，形核率与过冷度之间是呈抛物线的关系。

(2) 非均匀形核

1) 模型：外来物质为一平面，固相晶胚为一球冠。

2) 自由能变化：表达式与均匀形核相同。

3) 临界形核功

计算时利用球冠体积、表面积表达式，结合平衡关系 $\sigma_{lw} = \sigma_{sw} + \sigma_{sl} \cos \theta$ 计算能量变化和临界形核功。

$$\Delta G_{k\text{非}} / \Delta G_k = (2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta) / 4$$

a $\theta = 0$ 时， $\Delta G_{k\text{非}} = 0$ ，杂质本身即为晶核；

b $180^\circ > \theta > 0$ 时， $\Delta G_{k\text{非}} < \Delta G_k$ ，杂质促进形核；

c $\theta = 180^\circ$ 时， $\Delta G_{k\text{非}} = \Delta G_k$ ，杂质不起作用。

4) 影响非均匀形核的因素

a 过冷度：(N - ΔT 曲线有一下降过程)。

b 外来物质表面结构： θ 越小越有利。点阵匹配原理：结构相似，点阵常数相近。

c 外来物质表面形貌：表面下凹有利。

【知识点 4】晶体长大

1 连续长大

2 二维晶核

3 借螺型位错长大

【知识点 5】纯晶体凝固时生长形态

1 正温度梯度下

2 负温度梯度下

6.2 本章重难点总结

6.2.1 重难点知识点总结

相律、纯晶体凝固时生长形态

6.2.2 本章重难点例题讲解

【例题 1】分析金属或合金的结晶形态。

解析：（1）纯金属：正温度梯度下，由于界面上即使有凸起部分伸入温度较高的液体中，其生长速度也会减缓甚至停止，周围过冷度会赶上来，导致凸起部分消失，故晶体生长以接近平面状向前推移。

负温度梯度下，相界面处温度由于结晶潜热的释放而升高，使液相处于过冷条件下。若部分相界面凸起到液相中，则可处于温度更低的液相中，固液界面形成许多神像液体的分枝，称为树枝晶。

（2）合金：液相前沿温度梯度为负时，界面可凸出长大，并可呈树枝状生长。此外，此时界面前沿液体中实际温度低于溶质分布所决定的凝固温度时产生过冷，即成分过冷。

易错点：纯金属与合金、正负温度梯度下的分类讨论。

【例题 2】从热力学（能量）角度分析纯金属在凝固过程中均匀形核时的临界晶核形成过程。

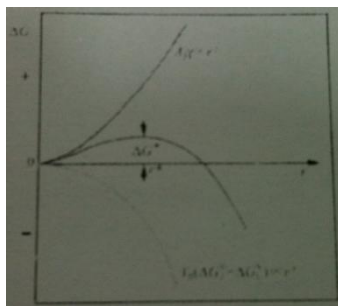
解析：凝固过程中，液相中存在结构起伏，形成短程有序原子集团。在过冷液体中出现晶坯能量变化：

（1）新相形成使系统自由能降低，降低量为 $V_{\beta}\Delta G_v=4/3\pi r^3\Delta G_v$ ，为相变的驱动力；

（2）晶坯构成新的表面，引起表面自由能的升高，增加量为 $A_{\beta}\gamma=4\pi r^2\gamma$ ，为相变的阻力。

固液相变，体积应变能完全释放掉，其值为 0。故总自由能变化为上述二者之和：

$$\Delta G=V_{\beta}\Delta G_v+A_{\beta}\gamma=4/3\pi r^3\Delta G_v+4\pi r^2\gamma$$



存在临界半径 r^* ， ΔG 在 $r=r^*$ 时达到最大值； $r<r^*$ 时，晶核的长大会使自由能增加，晶坯不稳定，最终熔化消失； $r>r^*$ 时，晶坯长大会使自由能降低，从而成为稳定的晶核。因此，晶坯只有达到临界半径才能成为稳定的晶核。

易错点：凝固形核的热力学条件。母相中通过涨落形成的原子集团，若能长成稳定或亚稳定的结构，或核心达到一定的尺寸，即可成为新相的核心。驱动力：新相与旧相之间的自由能差；阻力：新增的界面能。

【例题 3】与液态结晶过程相比，固态相变有什么特点？这些特点对固态相变后形成的组织有什么影响？

解析：相同点：

- (1) 都是相变，由形核、长大组成；
- (2) 临界形核半径、临界形核功形式相同；
- (3) 转变动力学也相同；
- (4) 相变的驱动力都是新旧两相化学位差。

不同点：

- (1) 固态相变阻力多了应变能一项，造成固态相变的临界半径和形核功增大；
- (2) 非均匀形核存在特定的取向关系，形成共格半共格界面；
- (3) 生长方面出现惯习现象，形成特殊的组织形态，如片状组织；亚稳态的出现减小相变阻力。

易错点：固态相变本身属于相变，但是一种特殊的相变。固态相变与其它相变遵循着共同的相变规律（如驱动力、动力学等等），且具有自身的特殊性：由于新旧相之间密度不同而导致了弹性应变能的存在；为减小长大阻力而出现惯习现象等。

6.3 本章典型题库

6.3.1 作业

- 1 为什么 r_{\max} 会随过冷度 ΔT 而变？
- 2 从热力学（能量）角度分析纯金属在凝固过程中均匀形核时的临界晶核形成过程。

6.3.2 作业答案

- 1 由 i 个原子组成的原子团的概率为 $\exp(-\Delta G_i/kT)$ ，随着原子团尺寸的增加，出现该尺寸原子团的概率会急剧降低。从仪器可观察到的角度看，每个温度都存在一个原子团尺寸，大于这个尺寸的原子团实际存在概率已小到难以观察到，这个尺寸定义为 r_{\max} 。如果定义原子团出现的某一概率的尺寸为 r_{\max} ，即定义 $n_i=\exp(-\Delta G_i/kT)$ 等于某一常数时对应的原子团尺寸为 r_{\max} 。

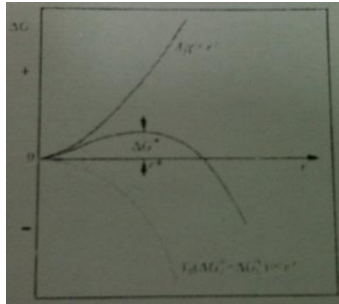
2 凝固过程中，液相中存在结构起伏，形成短程有序原子集团。在过冷液体中出现晶坯能量变化：

(1) 新相形成使系统自由能降低，降低量为 $V_{\beta}\Delta G_V=4/3\pi r^3\Delta G_V$ ，为相变的驱动力；

(2) 晶坯构成新的表面，引起表面自由能的升高，增加量为 $A_{\beta}\gamma=4\pi r^2\gamma$ ，为相变的阻力。

固液相变，体积应变能完全释放掉，其值为 0。故总自由能变化为上述二者之和：

$$\Delta G=V_{\beta}\Delta G_V+A_{\beta}\gamma=4/3\pi r^3\Delta G_V+4\pi r^2\gamma$$



存在临界半径 r^* ， ΔG 在 $r=r^*$ 时达到最大值； $r<r^*$ 时，晶核的长大会使自由能增加，晶坯不稳定，最终熔化消失； $r>r^*$ 时，晶坯长大会使自由能降低，从而成为稳定的晶核。因此，晶坯只有达到临界半径才能成为稳定的晶核。

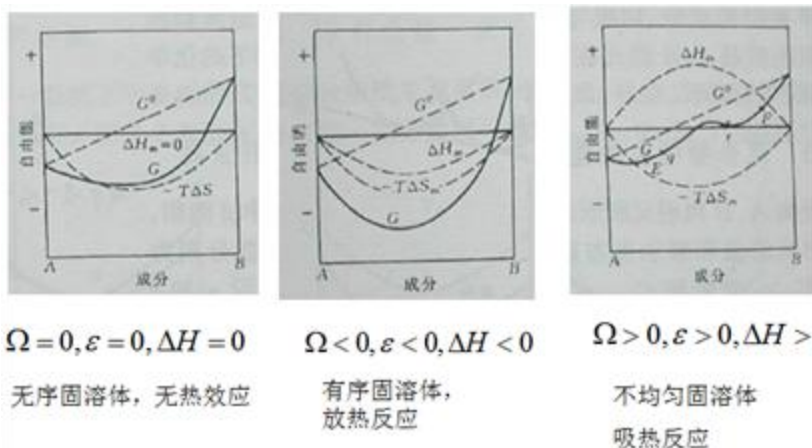
第七章 二元系相图和合金的凝固与制备原理

本章节包括 2 个知识点，固溶体自由能-成分曲线、二元相图的种类，其中必须掌握的知识点为 5 个，即上述知识点均需要掌握。

在复习过程中，首先要了解知识点，通过对教材的阅读，熟悉相应知识点，最后再通过本讲义如下内容对应的例题，从分析、解题、易错点到布置作业，完成相应知识点的掌握过程。

7.1 本章知识点串讲

【知识点 1】固溶体自由能-成分曲线



【知识点 2】二元相图的种类

- 1 匀晶相图
- 2 共晶相图
- 3 包晶相图
- 4 其它相图

7.2 本章重难点总结

7.2.1 重难点知识点总结

各种类型的二元相图。

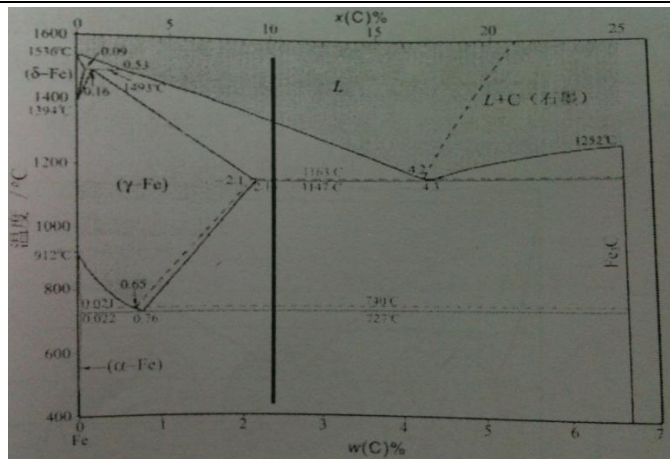
7.2.2 本章重难点例题讲解

【例题 1】根据 Fe-C 相图,

- 1 写出其中的三相反应式;
- 2 画出 $x(\text{Zn})=0.80$ 合金的缓慢冷却曲线, 并写出各阶段相对应的组织;
- 3 画出上述合金缓慢冷却到室温时的组织示意图, 并计算各组织组成物的相对含量。

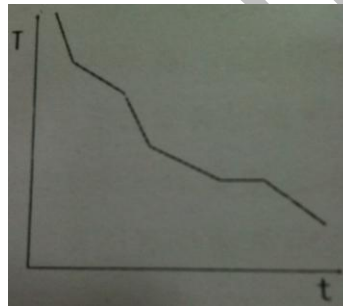
解析: (1) 共晶反应

(2) 参考铁碳相图。如 1.1wt% 铁碳合金。

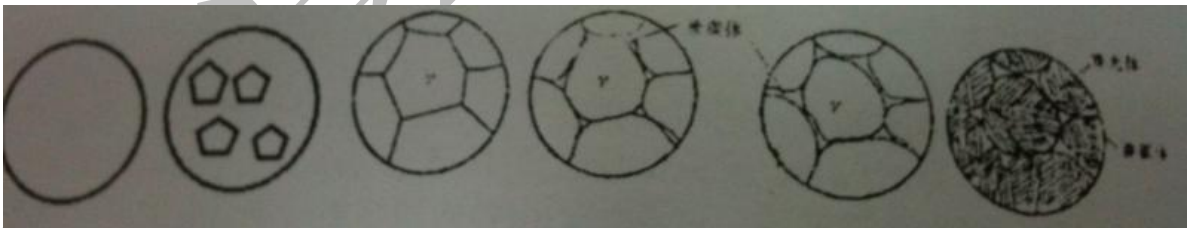


1.1%钢由液相区冷却，先进入 $L + \gamma$ 奥氏体两相区，形成枝晶或等轴状 γ 奥氏体相，之后进入奥氏体区；继续冷却，剩余奥氏体转化为珠光体，最后组织为珠光体+网状二次渗碳体。

步冷曲线：



组织转变：



易错点：相图的识记及理解、应用。

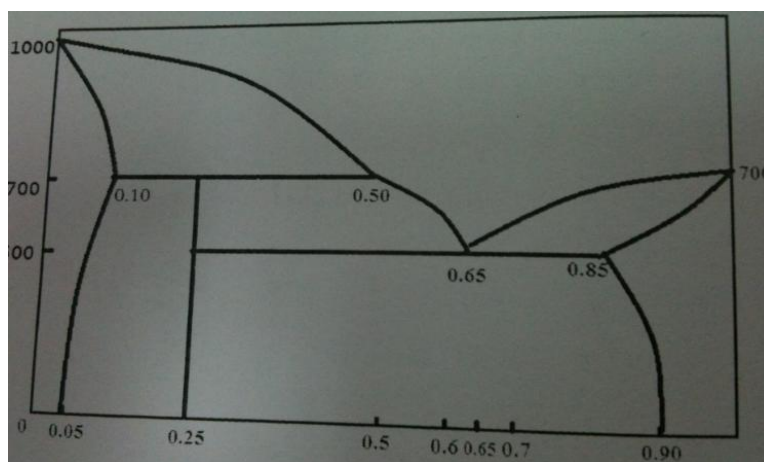
【例题 2】组元 A 和组元 B 的熔点分别为 1000°C 和 700°C ，室温时 B 在 A 的固溶体 α 中的固溶度是 $x_B=0.05$ ，A 在 B 的固溶体 β 中的固溶度是 $x_A=0.10$ ；在 700°C 时有一个三相平衡，在此温度 α 固溶体的成分是 $x_B=0.1$ ，一个成分为 $x_B=0.30$ 的合金在稍高于 700°C 时存在 50% α 相和 50%液相，在稍低于 700°C 时则存在液相和化合物 A_3B 两相；在 500°C 时存在另一个三相平衡，液相($x_B=0.65$)分解为化合物 A_3B 和 β 固溶体($x_B=0.85$)两相。试构造一个合理的 A-B 二元相图。

解析：由一个成分为 $x_B=0.30$ 的合金在稍高于 700°C 时存在 50% α 相和 50%液相，通过杠杆定律得出

液相成分为 0.50;

由化合物 A_3B , 得出 $x_B=0.25$;

绘制相图:

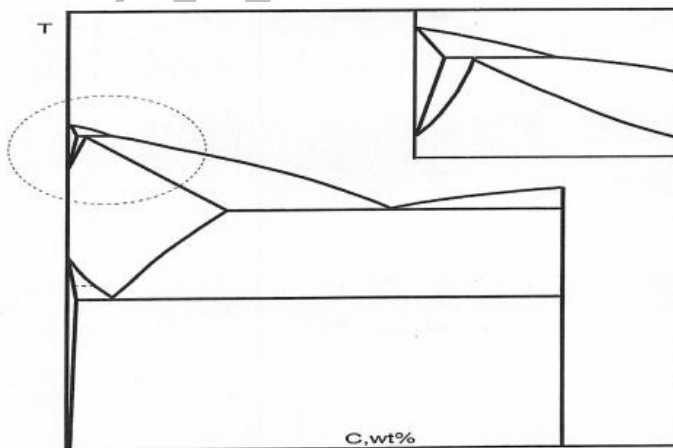


易错点: 充分挖掘题目中的信息, 通过关键点、线, 确定相图。

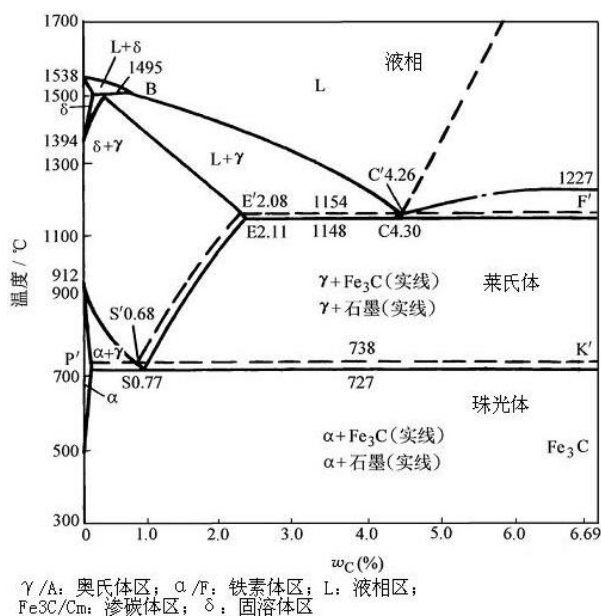
7.3 本章典型题库

7.3.1 作业

参考下面提供的示意图, 画出按组织分区的 $Fe-Fe_3C$ 相图, 写出各三相反应, 并说明分别为 1.0wt%C 和 3.0wt%C 的铁碳合金经过缓慢冷却在相关三相反应完成后形成的各组织特点。



7.3.2 作业答案



三相反应:

包晶反应: $L(0.53\%C) + \delta\text{-Fe}(0.09\%C) \rightarrow \gamma\text{-Fe}(0.17\%C)$

共晶反应: $L(4.3\%C) \rightarrow \gamma\text{-Fe}(2.11\%C) + \text{Fe}_3\text{C}(6.69\%C)$

共析反应: $\gamma\text{-Fe}(0.77\%C) \rightarrow \alpha\text{-Fe}(0.02\%C) + \text{Fe}_3\text{C}(6.69\%C)$

1.0%的钢由液相冷却时先进入 L+γ 奥氏体两相区, 形成枝晶或等轴状 γ 奥氏相, 然后进入奥氏体单相区; 继续冷却到 ~760°C 剩余的奥氏体转变为珠光体, 最后的组织是珠光体+网状二次渗碳体。

3.0%的铁碳合金(铸铁)结晶后组织为莱氏体加先共晶奥氏体, 缓冷后的室温组织为珠光体、二次渗碳体和变态莱氏体。树枝状分布的黑色区域是由先共晶奥氏体转变成的珠光体。其周围一圈白色组成物是由先共晶奥氏体析出的二次渗碳体, 其余部分为变态莱氏体。

第八章 三元相图

本章节包括 1 个知识点, 不变反应, 需要掌握。

在复习过程中, 首先要了解知识点, 通过对教材的阅读, 熟悉相应知识点, 最后再通过本讲义如下内容对应的例题, 从分析、解题、易错点到布置作业, 完成相应知识点的掌握过程。

8.1 本章知识点串讲

【知识点 1】不变反应

三种不变反应，不变反应就是四相平衡反应。

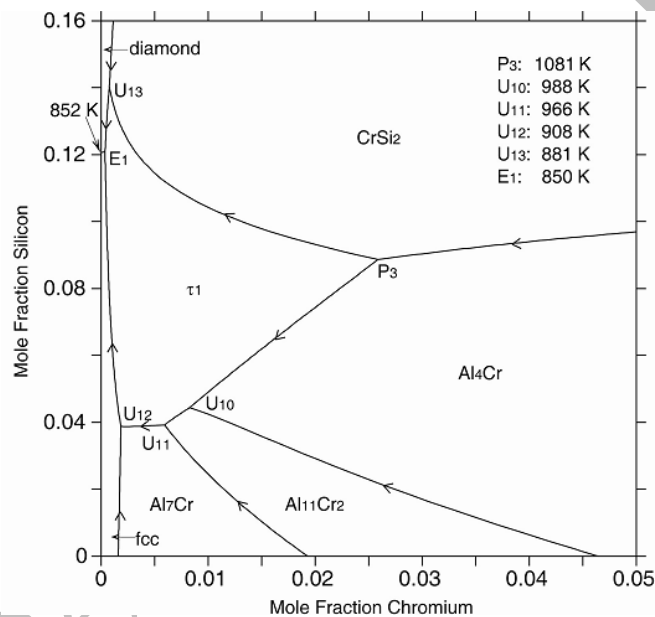
8.2 本章重难点总结

8.2.1 重难点知识点总结

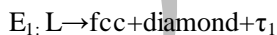
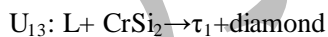
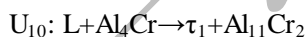
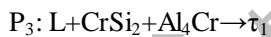
从三元相图中总结不变反应

8.2.2 本章重难点例题讲解

【例题 1】 根据下面的 Al-Cr-Si 体系的局部液相面投影图，写出该图中的四相不变反应式。



解析： 不变反应式：



易错点： 三元相图的识别，不变反应的书写。

第九章 材料的亚稳态

本章节包括 3 个知识点，非晶态材料、调幅分解、脱溶及脱溶贯序，其中必须掌握的知识点为 3 个，即上述知识点均需要掌握。

在复习过程中，首先要了解知识点，通过对教材的阅读，熟悉相应知识点，最后再通过本讲义如下内容对应的例题，从分析、解题、易错点到布置作业，完成相应知识点的掌握过程。

9.1 本章知识点串讲

【知识点 1】非晶态材料

1 非静态的形成

2 非晶态的结构

3 非静态的性能

(1) 力学性能

(2) 物理性能

(3) 化学性能

4 高分子的玻璃化转变

【知识点 2】调幅分解

自发脱溶过程，不需形核，通过溶质原子上坡扩散形成结构相同、成分周期性波动的纳米尺度共格微畴，以连续变化的溶质富集区与贫化区彼此交替均匀分布于整体中。

【知识点 3】脱溶及脱溶贯序

固溶体的脱溶过程主要是指过饱和的固溶体不断形成一个成分不同的新相，母相则由过饱和状态逐渐变为饱和状态，当母相完全饱和时脱溶及宣告结束。

脱溶贯序过程： GP 区 $\rightarrow \theta'' \rightarrow \theta' \rightarrow \theta$ 。

其中 GP 区是铜原子富集区； θ'' 、 θ' 是四方结构亚稳相，圆盘状，沿基体的 $\{100\}$ 面析出，具有共格/半共格界面，与基体存在特定的取向关系； θ 是四方结构稳定相，不规则形状。

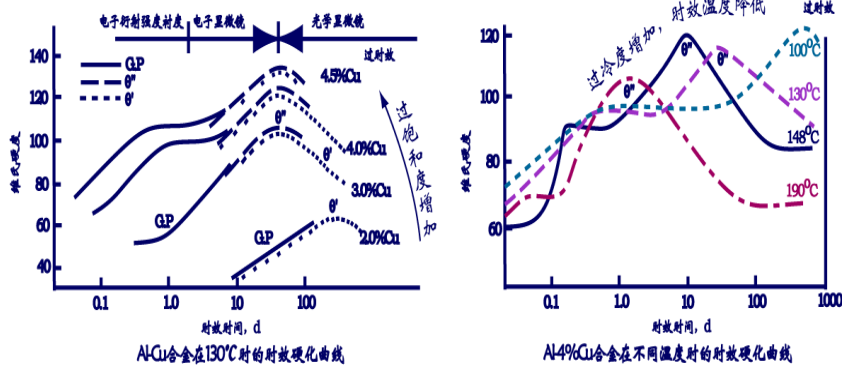
9.2 本章重难点总结

9.2.1 重难点知识点总结

脱溶过程及脱溶贯序。

9.2.2 本章重难点例题讲解

【例题 1】结合下面给出的 Al-Cu 合金时效硬化曲线，讨论在不同成分和热处理条件下可能出现的脱溶贯序，各阶段脱溶相的大小、形状和分布特点、与母相的界面关系及强化效果。



解析：（1）脱溶贯序

固溶体的脱溶过程主要是指过饱和的固溶体不断形成一个成分不同的新相，母相则由过饱和状态逐渐变为饱和状态，当母相完全饱和时脱溶及宣告结束。

脱溶贯序过程：GP 区→ θ'' → θ' → θ 。

其中 GP 区是铜原子富集区； θ'' 、 θ' 是四方结构亚稳相，圆盘状，沿基体的{100}面析出，具有共格/半共格界面，与基体存在特定的取向关系； θ 是四方结构稳定相，不规则形状。

（2）图中体现的规律

随铝中含铜量提高，过饱和度加大，脱溶驱动力加大，析出速度加快，硬度值增加。

时效温度低时，出现的硬度峰值比较高，但需要的时间比较长。时效温度越高，扩散速度加快，析出加快，但过饱和度减小，脱溶驱动力减小，有可能析出的贯序不完全，GP 区或亚稳相可能不出现。

时效强化主要靠 GP 区和 θ'' 相，因两者很细小、弥散，有共格或半共格界面，强化效果好。

易错点：本题主要考察脱溶贯序的相关知识。固溶体的脱溶过程主要是指过饱和的固溶体不断形成一个成分不同的新相，母相则由过饱和状态逐渐变为饱和状态，当母相完全饱和时脱溶即宣告结束。而固溶体的脱溶过程应遵循一定的脱溶贯序。本题以具体的曲线为载体，考察了上述知识。复习中应掌握基本概念，并注重针对具体题目的应用。

【例题 2】调幅分解

解析：过饱和固溶体在一定温度下分解成结构相同、成分不同的两个相的过程。

调幅分解是自发的脱溶过程，它不需要形核，其成分在拐点线之间，母相的任何涨落都会导致吉布斯自由能的减小，系统自动地分解为富 A 和富 B 的两部分，通过上坡扩散使两部分的成分发生连续变化，直至达到形成成分不同、结构相同的两个相。

易错点：明确调幅分解发生的条件是过饱和固溶体；识记具体概念。

【例题 3】脱溶

解析：一个固溶体体系在高温时是单相（未饱和），因为溶解度一般随温度降低而降低，这个单相体系冷却到低温时变成不稳定的过饱和固溶体。若条件允许，将会发生过饱和固溶体脱溶分解，从 α 母相中产生 β ， β 的产生和长大过程称为脱溶。

反应式： $\alpha_{\text{过饱和}} \rightarrow \alpha_{\text{饱和}} + \beta$

易错点：脱溶概念的识记。

9.3 本章典型题库

9.3.1 作业

1 液体冷却时形成晶体或非晶玻璃体的内部原因和外部条件是什么？解释为什么金属材料凝固时大多形成晶体，而陶瓷材料易于形成非晶玻璃体？

9.3.2 作业答案

1 决定液体冷却时能否结晶外部条件：冷却速度；内部条件：粘度。若冷速足够高，任何液体原则上均可转化为玻璃。

金属材料晶体结构比较简单，熔融时粘度较小，冷却时难阻止结晶过程发生，固态下大多为晶体。

陶瓷材料分子结构复杂，材料熔融时粘度很大，结晶动力学迟缓，冷却时原子迁移扩散困难，晶体组成过程很难进行，降低至某一临界温度以下时，固化成玻璃。

第二本书《金属学》（宋维锡，冶金工业出版社，1989 年第二版）

本书总计考察 7 个章节，其中重点章节是 2、3、4、5、6、7，材料基的复习必须踏踏实实尽可能掌握好每一个知识点。如果时间不够，就找重点看。如果个人找不到重点，应该首先仔细分析历年真题，因为历年真题常考的知识点就是本书的重点内容。总结完真题的知识点，要回归书本，将真题中的知识点充分挖掘其原形。最后再做真题，一定要将每一道题都弄清楚来龙去脉。也就是说，材料基的复习要经过真题——书本——真题的过程。本书与《材料科学基础》差异不大，第 2 至 7 章内容均与《材料科学基础》完全重复，虽表达方式有所差异，但考察知识点及重点完全相同，故本讲义仅讲述《金属学》第 8 章固态相变的相关知识。

第一章 金属及合金中的固态转变

本章节包括 3 个知识点，固态相变的种类、固态相变的一般特点、固溶体的脱溶，其中必须掌握的知识点为 3 个，即上述知识点均需要掌握。

在复习过程中，首先要了解知识点，通过对教材的阅读，熟悉相应知识点，最后再通过本讲义如下内容对应的例题，从分析、解题、易错点到布置作业，完成相应知识点的掌握过程。

1.1 本章知识点串讲

【知识点 1】固态相变的种类

- 1 扩散型相变
- 2 非扩散型相变
- 3 过渡型转变

【知识点 2】固态相变的一般特点

- 1 相变阻力
- 2 形核
 - (1) 非均匀形核
 - (2) 核心的取向关系
 - (3) 共格界面及半共格界面
- 3 新相成长方面特点
 - (1) 惯习现象
 - (2) 共格成长与非共格成长
- 4 新生相的组织形态
- 5 过渡相
- 6 非扩散转变——马氏体转变

【知识点 3】固溶体的脱溶

- 1 连续脱溶与不连续脱溶
- 2 脱溶过程

1.2 本章重难点总结

1.2.1 重难点知识点总结

固态相变的一般特点、脱溶

1.2.2 本章重难点例题讲解

【例题 1】结合下面给出的 Al-Cu 合金时效硬化曲线，讨论在不同成分和热处理条件下可能出现的脱溶贯序，各阶段脱溶相的大小、形状和分布特点、与母相的界面关系及强化效果。

解析：(1) 脱溶贯序

固溶体的脱溶过程主要是指过饱和的固溶体不断形成一个成分不同的新相，母相则由过饱和状态逐渐变为饱和状态，当母相完全饱和时脱溶及宣告结束。

脱溶贯序过程：GP 区 $\rightarrow \theta'' \rightarrow \theta' \rightarrow \theta$ 。

其中 GP 区是铜原子富集区； θ'' 、 θ' 是四方结构亚稳相，圆盘状，沿基体的 {100} 面析出，具有共格/半共格界面，与基体存在特定的取向关系； θ 是四方结构稳定相，不规则形状。

(2) 图中体现的规律

随铝中含铜量提高，过饱和度加大，脱溶驱动力加大，析出速度加快，硬度值增加。

时效温度低时，出现的硬度峰值比较高，但需要的时间比较长。时效温度越高，扩散速度加快，析出加快，但过饱和度减小，脱溶驱动力减小，有可能析出的贯序不完全，GP 区或亚稳相可能不出现。

时效强化主要靠 GP 区和 θ'' 相，因两者很细小、弥散，有共格或半共格界面，强化效果好。

易错点：本题主要考察脱溶贯序的相关知识。固溶体的脱溶过程主要是指过饱和的固溶体不断形成一个成分不同的新相，母相则由过饱和状态逐渐变为饱和状态，当母相完全饱和时脱溶即宣告结束。而固溶体的脱溶过程应遵循一定的脱溶贯序。本题以具体的曲线为载体，考察了上述知识。复习中应掌握基本概念，并注重针对具体题目的应用。

【例题 2】脱溶

解析：一个固溶体体系在高温时是单相（未饱和），因为溶解度一般随温度降低而降低，这个单相体系冷却到低温时变成不稳定的过饱和固溶体。若条件允许，将会发生过饱和固溶体脱溶分解，从 α 母相中产生 β ， β 的产生和长大过程称为脱溶。

反应式： α 过饱和 $\rightarrow \alpha$ 饱和 + β

易错点：脱溶概念理解深入。

【例题 3】与液态结晶过程相比，固态相变有什么特点？这些特点对固态相变后形成的组织有什么影响？

解析：相同点：

- (1) 都是相变，由形核、长大组成；
- (2) 临界形核半径、临界形核功形式相同；
- (3) 转变动力学也相同；
- (4) 相变的驱动力都是新旧两相化学位差。

不同点：

- (1) 固态相变阻力多了应变能一项，造成固态相变的临界半径和形核功增大；
- (2) 非均匀形核存在特定的取向关系，形成共格/半共格界面；
- (3) 生长方面出现惯习现象，形成特殊的组织形态，如片状组织；亚稳态的出现减小相变阻力。

易错点：固态相变本身属于相变，但是一种特殊的相变。固态相变与其它相变遵循着共同的相变规律（如驱动力、动力学等等），且具有自身的特殊性：由于新旧相之间密度不同而导致了弹性应变能的存在；为减小长大阻力而出现惯习现象等。

1.3 本章典型题库

1.3.1 作业

以含 Al-4wt%Cu 合金为例，给出其经过不同固溶时效工艺处理后的脱溶贯序；定性说明各阶段脱溶相的尺寸及分布特点、与母相的界面匹配关系及其强化效果等。

1.3.2 作业答案

固溶体的脱溶过程主要是指过饱和的固溶体不断形成一个成分不同的新相，母相则由过饱和状态逐渐变为饱和状态，当母相完全饱和时脱溶及宣告结束。

脱溶贯序过程： GP 区 $\rightarrow \theta'' \rightarrow \theta' \rightarrow \theta$ 。

其中 GP 区是铜原子富集区； θ'' 、 θ' 是四方结构亚稳相，圆盘状，沿基体的 $\{100\}$ 面析出，具有共格/半共格界面，与基体存在特定的取向关系； θ 是四方结构稳定相，不规则形状。

脱溶强化时存在时效硬化曲线，硬度随时间变化先增大，达到峰值后逐渐降低，硬度峰值大多位于 θ'' 充分发展阶段， θ' 出现后硬度开始下降；合金饱和度越大，硬化开始越早，达到的峰值越大。



总部地址：北京市海淀区北四环西路 66 号中国技术交易所大厦 A 座 17 层
万学考研专业课频道： <http://a.wanxue.cn>
万学主网： <http://www.wanxue.cn> 考研频道