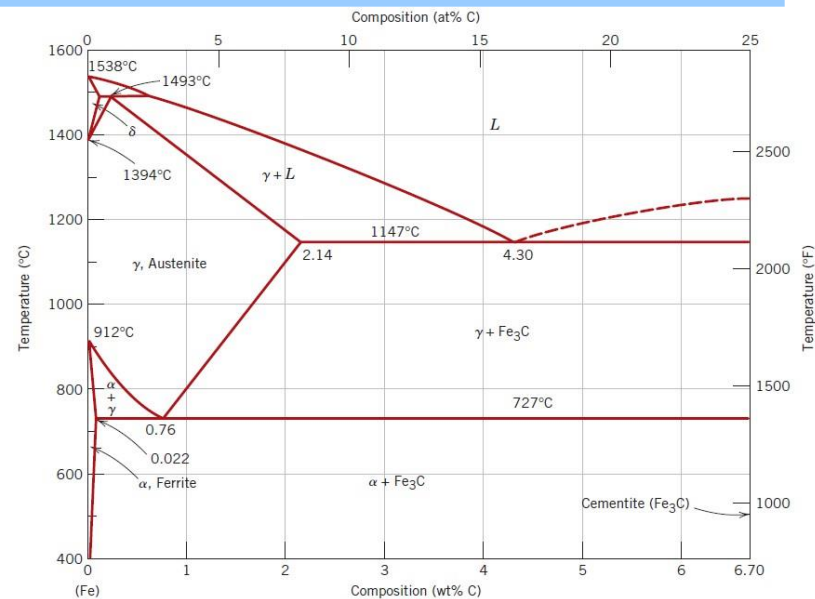


第二章金属材料组织和性能的控制

1. 纯金属的结晶
2. 合金的结晶
3. 金属的塑性加工
4. 钢的热处理
5. 钢的合金化
6. 表面技术

重点：

- (1) 基本概念
- (2) 各种组织的名称、形态、性能特点
- (3) 杠杆定律
- (4) 铁碳相图、典型铁碳合金的结晶过程（平衡）
- (5) 金属的塑性加工
- (6) 钢的热处理（非平衡）
- (7) 钢的合金化



第二章金属材料组织和性能的控制

内容提要

本章介绍金属材料组织和性能的影响因素及其控制方法。

重点阐明铁碳相图、铁碳合金平衡结晶过程、铁碳合金的成分-组织-性能关系。

重点阐明钢的热处理原理和热处理工艺。

简要阐述纯金属的结晶、金属的塑性加工、钢的合金化。

第二章金属材料组织和性能的控制

学习目标：

本章是工程材料课程的重点章。

着重掌握：铁碳相图，铁碳合金的平衡结晶过程，铁碳合金的成分-组织-性能关系。过冷奥氏体的转变，钢的淬透性、淬硬性。常用热处理等热处理工艺。合金元素对钢的热处理、钢的机械性能的影响。

熟悉纯金属、合金的结晶，金属的塑性加工、再结晶对金属组织和性能的影响规律。

表面技术部分作一般了解。

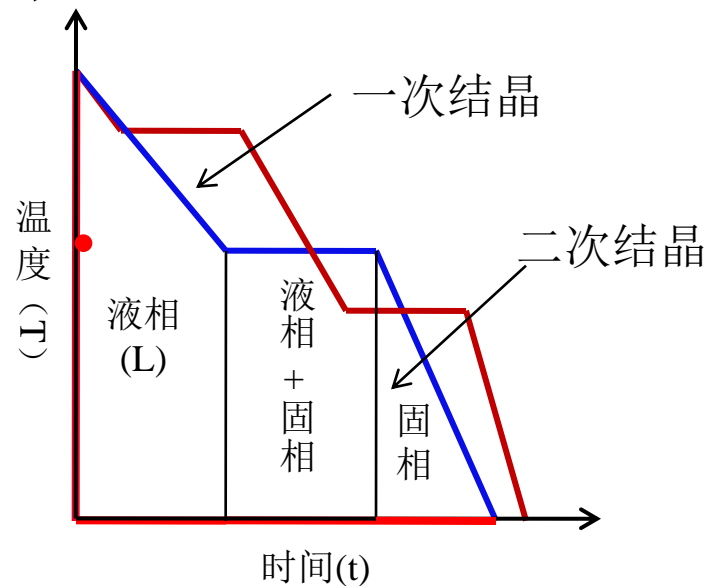
1. 纯金属的结晶

基本概念

结晶过程: 金属从一种原子排列状态转变为另一种原子排列状态(晶态)的过程, 如下图:

一次结晶: 金属从液体转变为固态(晶态)的过程。

二次结晶: 金属从一种固体晶态转变为另一种固体晶态的过程。



回顾: 什么是相?

纯金属结晶简图

1.1 纯金属的结晶

纯金属的结晶条件

过冷度

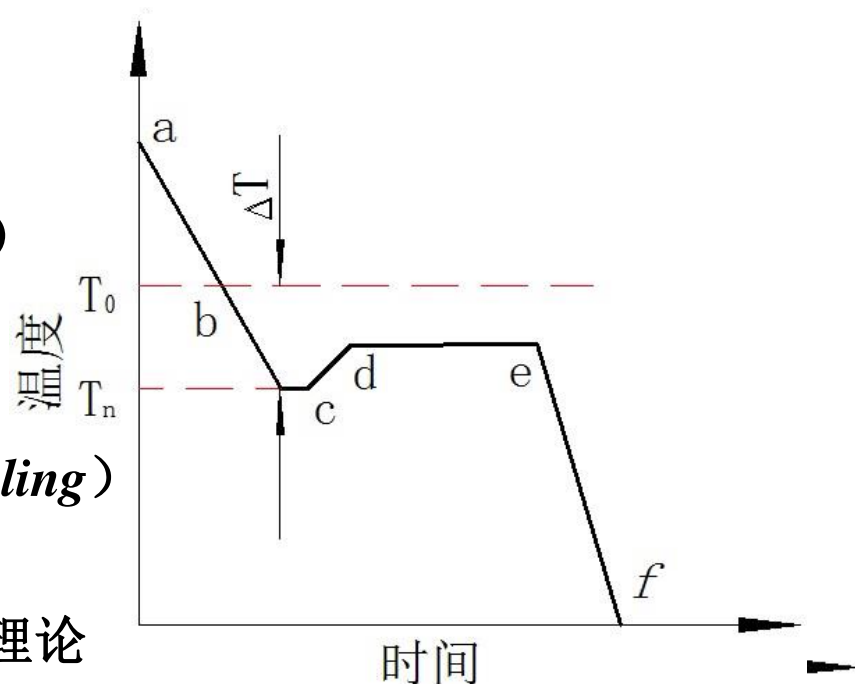
T_0 : 纯铜的熔点(理论结晶温度)

T_n : 开始结晶温度

ΔT : 过冷度 (*degree of supercooling*)

$$\Delta T = T_0 - T_n$$

过冷现象: 实际结晶温度小于理论结晶温度的现象。



纯铜的冷却曲线
不同冷却速度纯铜冷却曲线

冷却速度越大, 开始结晶温度
越低, 过冷度越大!

材料不同过冷度也不同

1.1 纯金属的结晶

纯金属的结晶条件

自由能

(free energy)

自由能：能够对外做功的那部分能量。

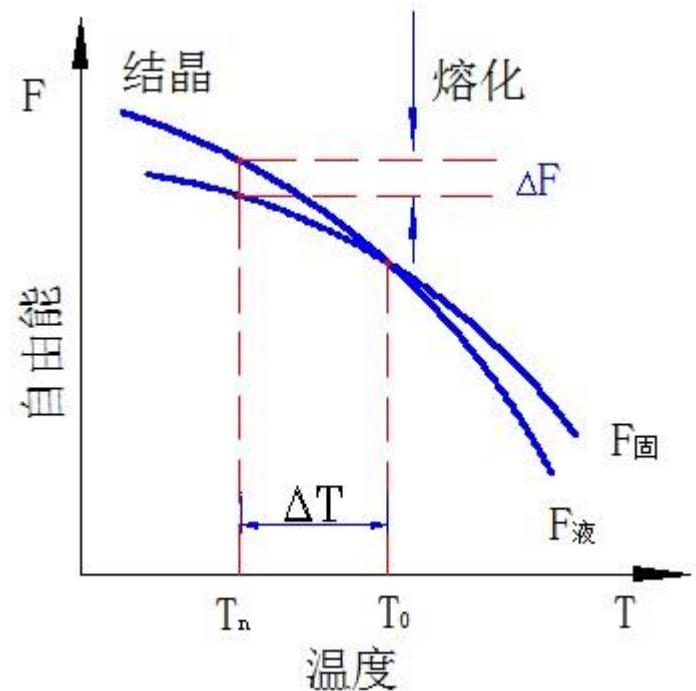
在一定条件下，金属哪种状态下的自由能低则金属保持那种状态。

$T < T_0$ ：固态 (T_0 理论结晶温度)

$T = T_0$ ：固态+液态 (长期共存)

$T > T_0$ ：液态

$\Delta F = F_{\text{固}} - F_{\text{液}} < 0$ (过冷)



金属在聚集状态时自由能与温度的关系的示意图

1.1 纯金属的结晶

纯金属的结晶条件

结晶条件:

液态金属结晶条件: 液态金属要结晶, 温度必须低于理论结晶温度 T_0 , 要有一定的过冷度 ΔT , 使金属在液态和固态之间存在自由能差 ΔF 。

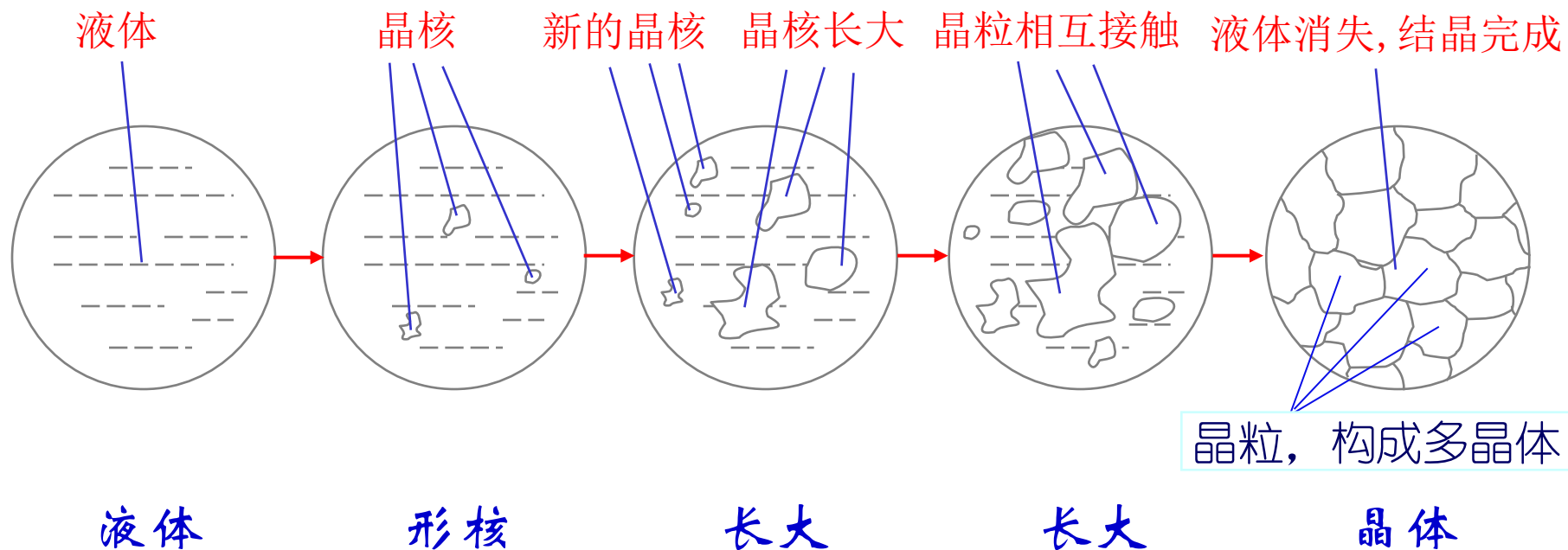
液态金属结晶的动力:

金属在液态和固态之间存在自由能差

1. 为什么结晶过程会出现平台?
2. 过冷现象, 结晶潜热是结晶的宏观现象。
3. 在非常缓慢冷却的条件下, 平台温度与理论结晶温度相差很小。如果冷却速度较快, 则纯金属结晶时是不能保持恒温的。

1.1 纯金属的结晶

纯金属的结晶过程 (形核+长大→结晶)



结晶的一般过程——形核和长大

1.1 纯金属的结晶

纯金属的结晶过程（形核+长大→结晶）

①形核（*nucleation*）——晶核的形成

形核的两种方式

自发形核（均匀形核，次要）

从液体内部自发形成晶核的方式。

自发形核需要的能量大，即需要较大的过冷度才有可能形成晶核。

非自发形核（非均匀形核，主要）

依附于液体中的杂质而形成晶核的方式。

非自发形核需要的能量小，在实际金属的结晶中往往起优先和主导作用。

晶核形成、晶体长大时晶体表面能的增加是金属结晶的阻力。

1.1 纯金属的结晶

纯金属的结晶过程（行核+长大→结晶）

②长大（*growth*）——晶体的长大

长大的两种方式

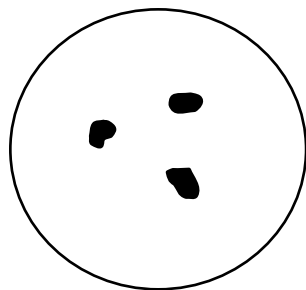
平面长大（过冷度小，次要）

晶体表面为密排面的规则形状。

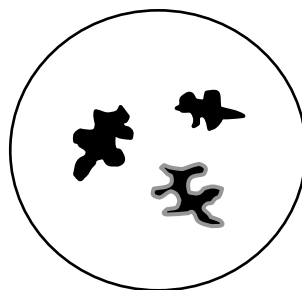
树枝状长大（过冷度大，杂质，主要）

犹如树的生长一样，晶核在长大时，首先生长成树干，然后树干上长出树枝。随后，树枝还可以长出更小的树枝（菱角处散热快温度低）。

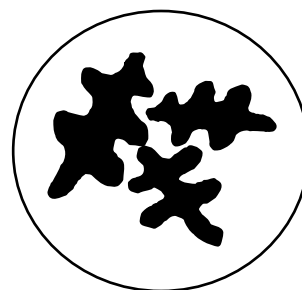
按树枝状生长的晶粒称为**树枝晶**或**枝晶**。



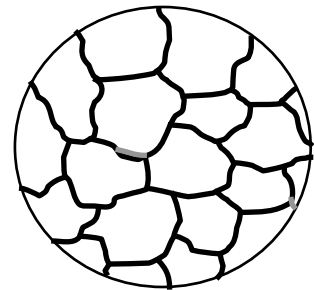
形核



长大



长大



1.2 同素异构转变

同素异构现象和同素异构体

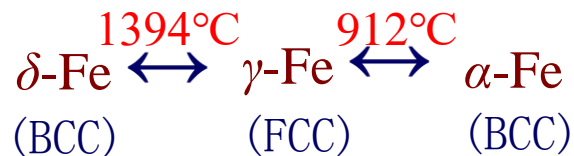
有些金属在固态下，存在两种或两种以上的晶格类型，这种现象称为同素异构或多晶型性。

以不同晶体结构存在的同一种金属的晶体称为该金属的同素异构体。

同素异构转变

同一种金属的同素异构体在一定的条件下会相互转化。同素异构转变就是这种在固态下随温度的改变由一种晶格转变为另一种晶格的现象。

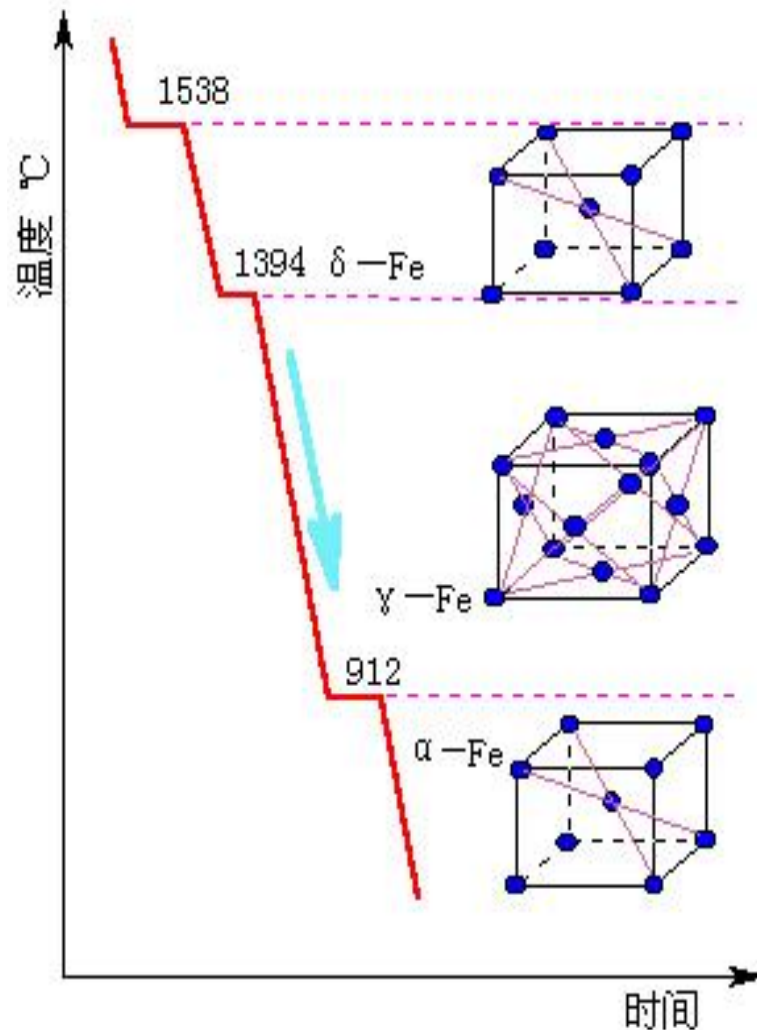
纯铁的同素异构转变



1.2 同素异构转变

同素异构现象和同素异构体

奥斯蒙(Floris Osmond, 1849~1912)。法国金相学家。1887年用利用差热分析方法系统地研究了钢的相变，发现了铁的同素异构转变。



1.2 同素异构转变

同素异构转变的特点

金属的同素异构转变与液态金属的结晶过程相似，故称为二次结晶或重结晶。

- ①同素异构转换具有固定的转变温度，转变发生时需要过冷，并放出潜热；
- ②同素异构转变在固态下进行，因此转变需要较大的过冷度；
- ③同素异构体的形成经过形核、长大过程，新相晶核往往在旧相的晶界或某些特定晶面上形成；
- ④同一种金属的同素异构体通常具有不同的晶格致密度，因此比容也不同，转变前后往往伴随着体积的变化，导致内应力的产生。



物质单位重量的体积称为比容。

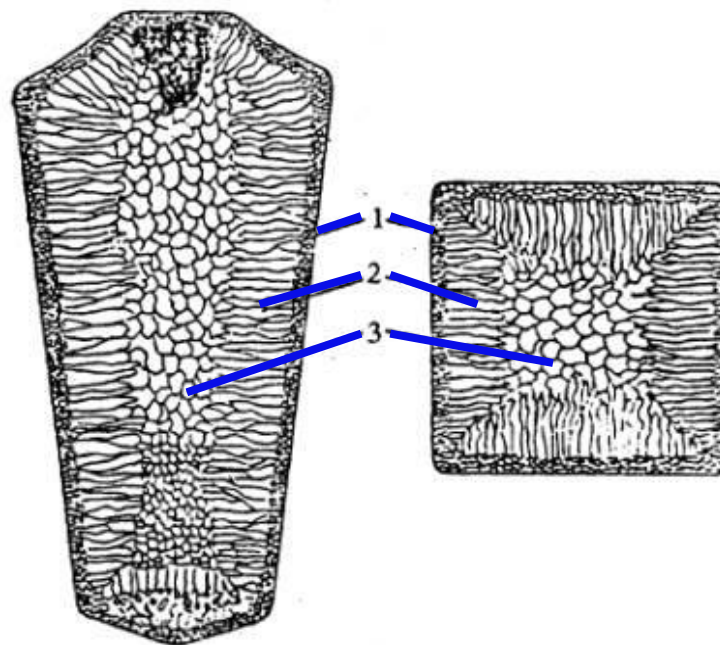
1.3 铸锭的结构

铸锭的结构

1. 细等轴晶区

2. 柱状晶区

3. 粗等轴晶区



1.3 铸锭的结构

柱状晶

柱状晶性能：

柱状晶性能具有明显的方向性。

沿柱状晶晶轴方向的强度较高。

主要受单向载荷的机器零件，如汽轮机叶片等，柱状晶结构是非常理想的。

1.3 铸锭的结构

等轴晶

没有弱面，晶枝彼此嵌入，结合较牢，性能均匀，无方向性，是一般情况下的金属特别是钢铁铸件所要求的结构。

铸造温度低，冷却速度小等，有利于截面温度的均匀性，促进等轴晶的形成。

用机械振动、电磁搅拌等方法，可破坏柱状晶的形成，有利于等轴晶的形成。

若冷却速度很快，可全部获得细小的等轴晶。

砂型铸造往往得到较粗的等轴晶。

1.3 铸锭的结构

铸锭缺陷

(1) **缩孔**：金属凝固时体积收缩，最后凝固的地方如果得不到液体的补充形成缩孔。附近杂质较多，一般切除。

(2) **疏松**：疏松即分散缩孔，是结晶时不能保证液体的补给而在枝晶间和枝晶内形成的细小分散的缩孔。疏松在热轧过程中可压合。

(3) **气孔**：金属液体凝固时要析出气体形成气泡。气孔能造成微细裂纹和表面起皱现象，影响金属质量。在冶炼和铸锭过程中，应严格控制可能产生气体的各种因素。

1.4 晶粒大小控制

晶粒大小对金属性能的影响

在常温下，金属的晶粒越细小，其综合力学性能越好。即金属的晶粒被细化，不仅能提高强度和硬度，还能同时提高塑性和韧性。（细晶强化）

晶粒大小的评定 固溶强化？

①晶粒度的概念

评定晶粒大小的指标是晶粒度，一般可用晶粒的平均直径或平均面积来表示。

工业上通常采用晶粒度等级表示晶粒大小。标准晶粒度分为八级，1级最粗，8级最细。

②影响晶粒度的因素

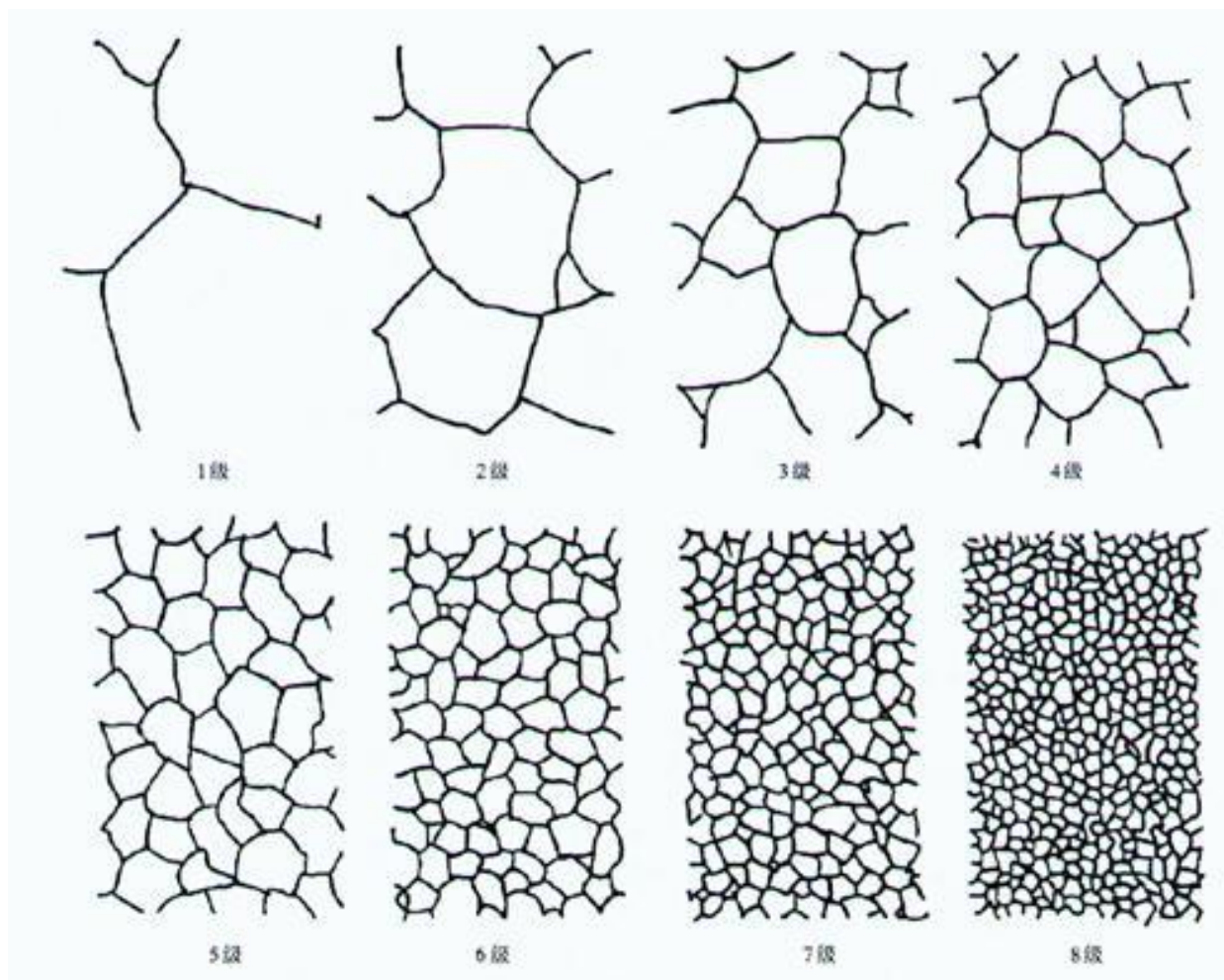
形核率(N)——单位时间、单位体积液态金属中形成晶核的数目。

长大速度(G)——单位时间内晶体长大的长度。

比值 N/G 越大，则结晶后获得的晶粒越细小，反之则越粗大。

1.4 晶粒大小控制

晶粒大小的评定



标准晶粒度等级

1.4 晶粒大小控制

控制晶粒大小的方法

①增大过冷度

措施：降低浇注温度。如：冷却能力强的金属型铸模

原理：提高冷却速度。过冷度大，则比值 N/G 大。

②变质处理

措施：向液态金属中加入变质剂或孕育剂。

原理：变质剂作为非自发形核的核心，提高了形核率(N)。

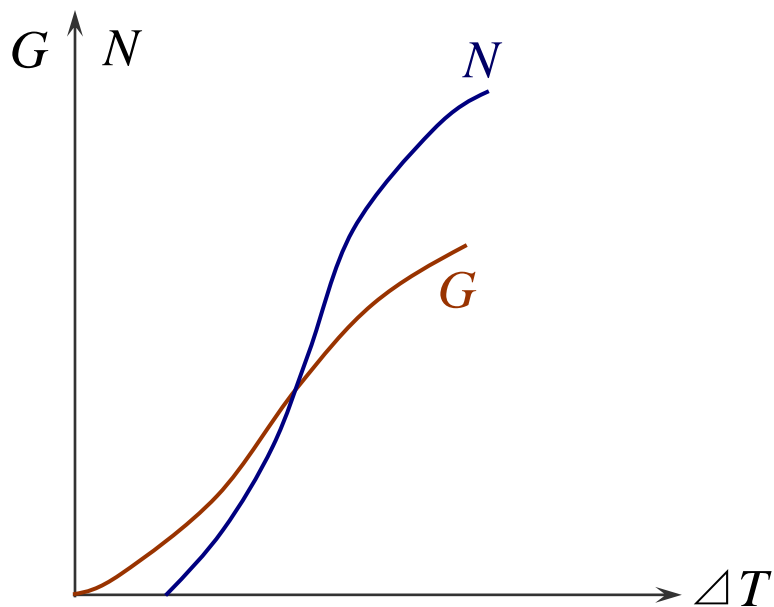
③振动、电磁搅拌

措施：对即将凝固的金属进行机械振动、超声波振动和电磁搅拌。

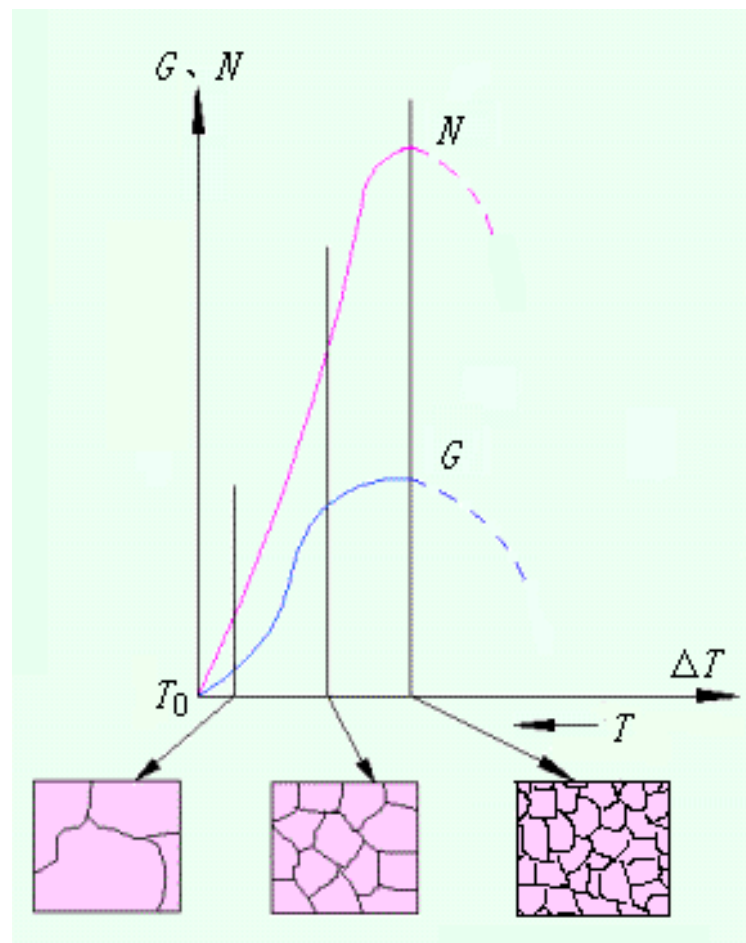
原理：通过振动或搅拌，一方面能使生长中的枝晶破碎，从而增加形核率(N)；另一方面可以输入能量以促进自发形核。



1.4 晶粒大小控制



过冷度对形核率和长大速度的影响



1.5 定向结晶

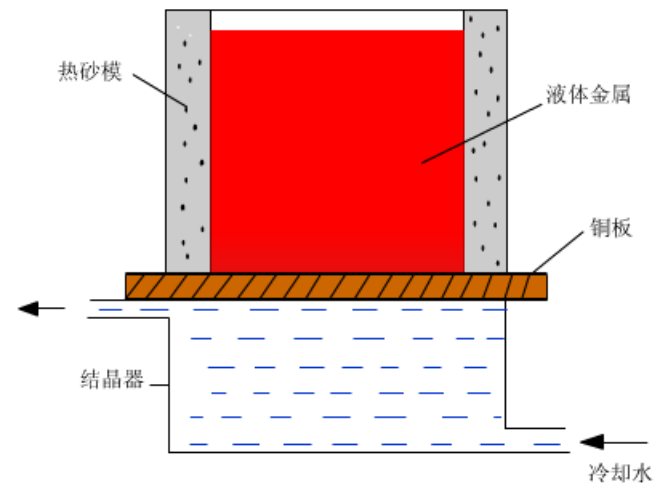
柱状晶的获得：

金属加热温度高，冷却速度大，铸造温度高和浇注速度大等，有利于在铸锭或铸件的截面上保持较大的温度梯度，获得较发达的柱状晶。

结晶时单向散热，有利于柱状晶的生成。

采用定向结晶获得柱状晶结构。

如：生产细长柱状晶的铝镍钴永磁合金。



1.6 单晶的制取

**单晶是电子元件和激光元件的重要原料。
喷气发动机叶片开始应用金属单晶。**

根据结晶理论，制备单晶的基本要求是液体结晶时只有一个晶核，要严格防止另外形核。

纯金属的结晶

本节小结

金属结晶条件：要有一定的过冷度，

金属结晶推动力：固态金属和液态金属之间的自由能差。

金属结晶过程：形核、长大

细化铸态金属晶粒措施：增大过冷度、变质处理、振动、电磁搅拌

2. 合金的结晶

基本概念

相图 (*phase diagram*) 表明合金系中各种合金相的平衡条件和相与相之间关系的一种简明示意图。

相平衡 (*phase equilibrium*) 在一定条件下合金系中参与相变过程各相的成分和质量分数不在变化所达到的一种状态。

相变 合金中的相从一种类型转变为另一种类型的过程。

特别提示

相图是在热力学平衡的条件下建立起来的。测定相图最常用的方法是热分析法，它要求在合金冷却时，其冷却速度非常缓慢，从而能够满足热力学平衡的条件。因此相图又称为平衡相图，平衡图。

相图的作用

利用相图，可以了解不同成分的材料在不同条件下：

- ①存在哪些相；
- ②各相的相对量；
- ③成分、温度变化时材料中发生的相变。

2.1 二元合金的结晶

相图的制作过程 (例Cu-Ni)

1、配制一系列不同成分的Cu—Ni合金；

例如：100%Cu、80%Cu—20%Ni、60%Cu—40%Ni、40%Cu—60%Ni、
20%Cu—80%Ni、100%Ni等6个合金。

2、分别测定上述合金的冷却曲线； ▶

3、在冷却曲线上找出合金的各个临界点； ▶

临界点指合金在冷却时凝固开始和凝固终了的温度点。

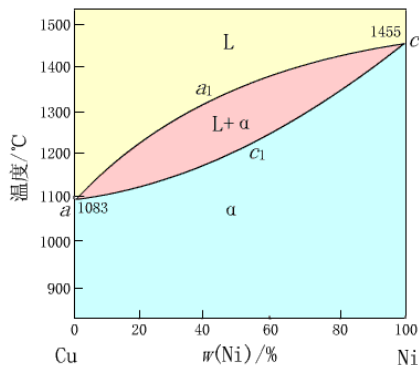
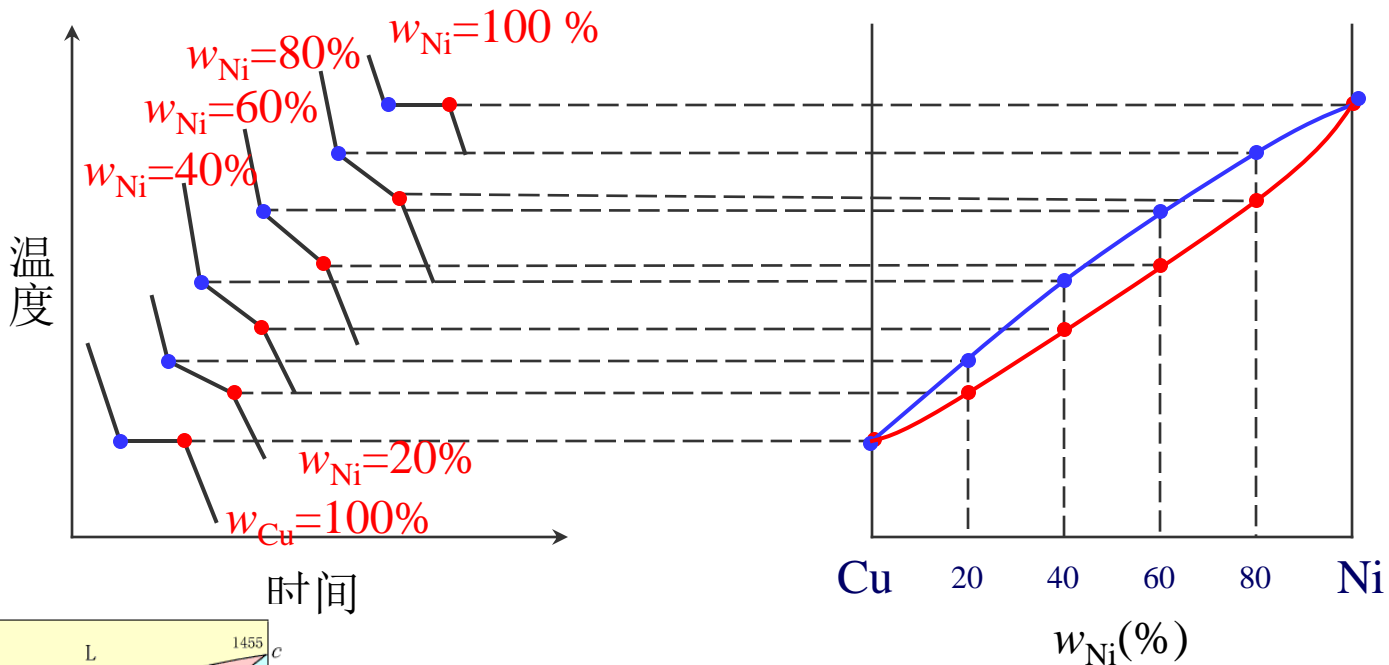
4、将各临界点标在相图的坐标平面上； ▶

二元相图的坐标平面，其纵座标为温度，横座标为成分。

5、在相图平面上将性质相同的临界点分别连接起来，即建立起相图。 ▶

2.1 二元合金的结晶

相图的制作过程 (例Cu-Ni)



Cu-Ni二元合金相图的建立

二元合金与纯金属结晶的区别?



2.1 二元合金的结晶

二元合金的结晶

① 匀晶相图 (*isomorphous phase diagram*)

匀晶反应: 从液相中直接结晶出固溶体的反应 (转变) 如Cu-Ni。 $L \rightarrow \alpha$

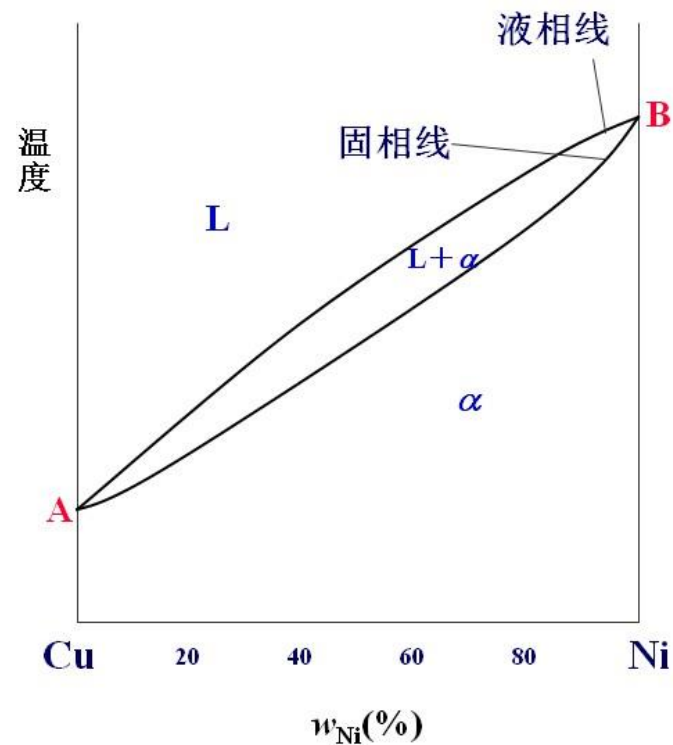
匀晶相图: 两组元在液态和固态下均能无限互溶, 冷却时发生匀晶反应的相图。

相图分析内容

1. 各区域的相组成、质量比
2. 结晶过程的分析

组元: 组成合金独立的、最基本的单元

相: 具有一定化学成分和一定晶体结构的均匀组成部分

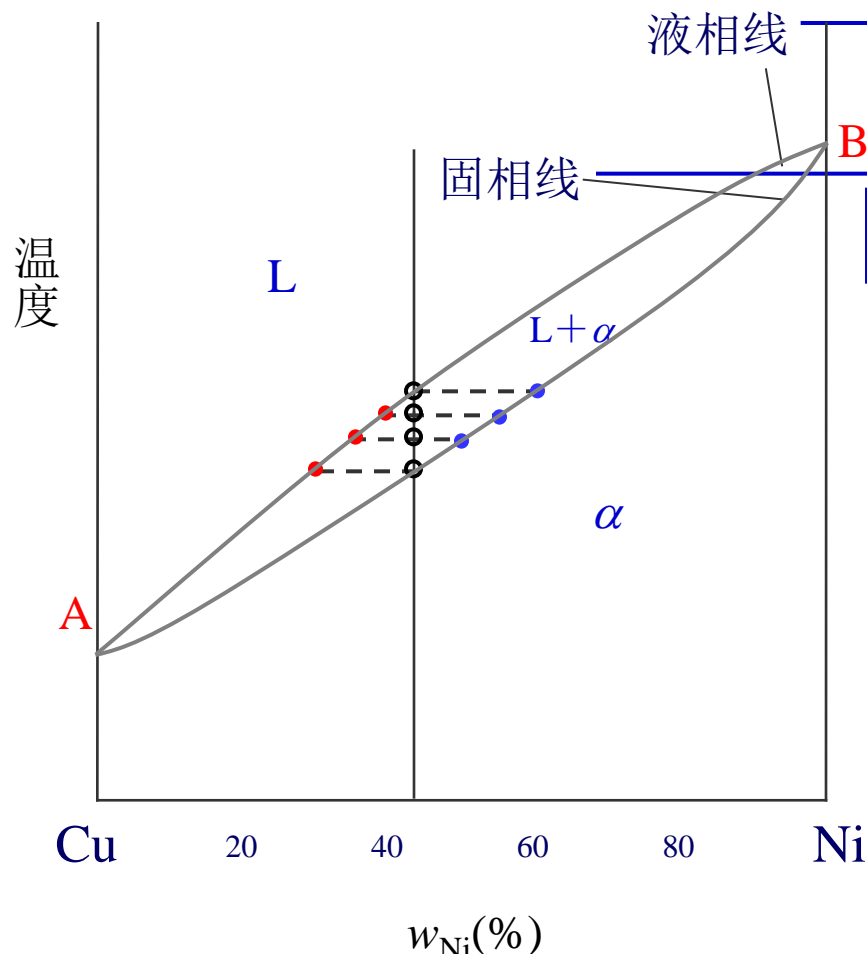


Cu-Ni 合金相图

2.1 二元合金的结晶

二元合金的结晶

① 匀晶相图 (*isomorphous phase diagram*)



合金结晶开始的温度连线

合金结晶终了的温度连线

结晶过程两个方面的变化：

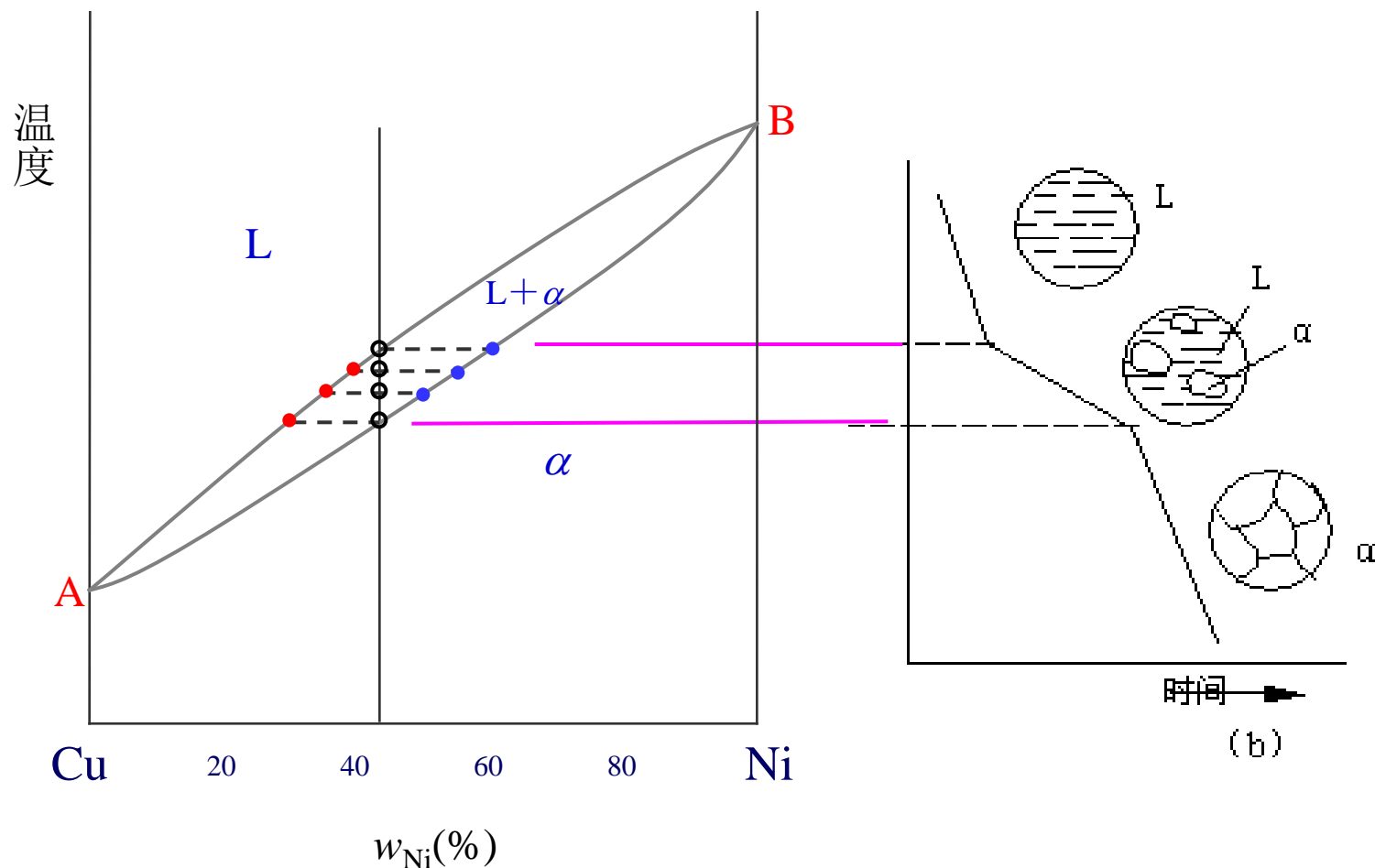
- ① L相和 α 相的成分分别沿着液相线和固相线变化；
- ② L相和 α 相的相对量不断变化。

Cu-Ni合金相图

2.1 二元合金的结晶

二元合金的结晶

① 匀晶相图 (isomorphous phase diagram)



Cu-Ni合金相图

2.1 二元合金的结晶

二元合金的结晶

① 匀晶相图 (*isomorphous phase diagram*)

枝晶偏析:

实际生产时，合金的结晶过程是非平衡的。

所谓偏析是指固溶体在结晶过程中先结晶的部分与后结晶的部分存在成分差异的现象。晶内偏析就是发生在一个晶粒内的成分不均匀现象

2.1 二元合金的结晶

二元合金的结晶

① 匀晶相图 (*isomorphous phase diagram*)

枝晶偏析:

合金在结晶时通常以树枝状形式长大，从而造成了树干和树枝在成分上的差异，这就是枝晶偏析。枝晶偏析是一种冶金缺陷。

枝晶偏析一般可以通过均匀化退火(或称扩散退火)予以减轻或消除。

匀晶结晶特点:

1. 包括形核、长大两个过程，趋于树枝状长大；
2. 变温结晶过程；
3. 结晶过程可能会出现枝晶偏析。

2.1 二元合金的结晶

二元合金的结晶

② 共晶相图 (*eutectic phase diagram*)

共晶反应: 从液相中同时结晶出两种不同的固相的反应。 $L \rightarrow \alpha + \beta$

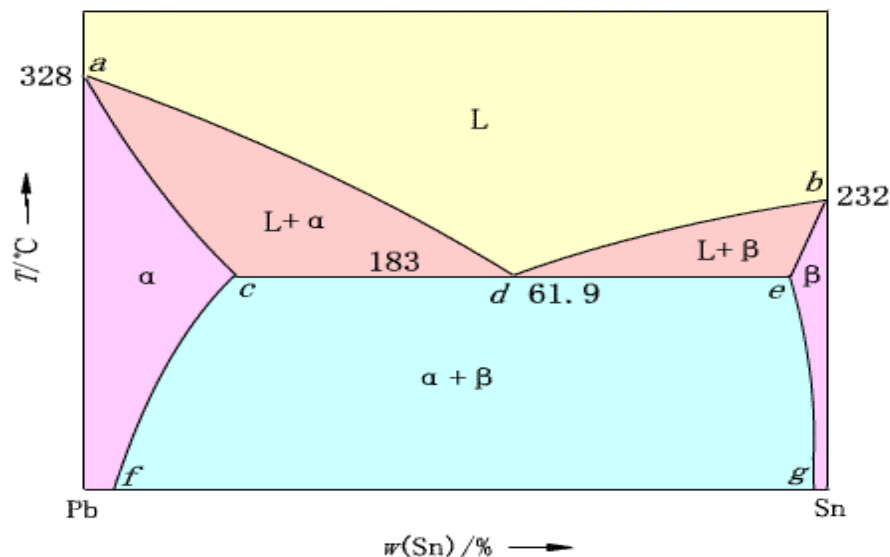
共晶相图: 两组元在液态无限互溶、固态有限互溶或完全不互溶，冷却时发生共晶反应的相图。

相图分析内容

1. 掌握各区域相的组成;
2. 掌握每条线上发生的反应;
3. 利用杠杆定律求相的质量。

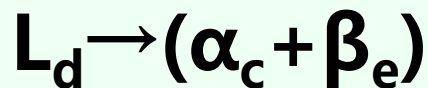
组织组成物

合金中具有确定本质、一定形成机制的特殊形态的组成部分，可以是单相或是两相混合物。



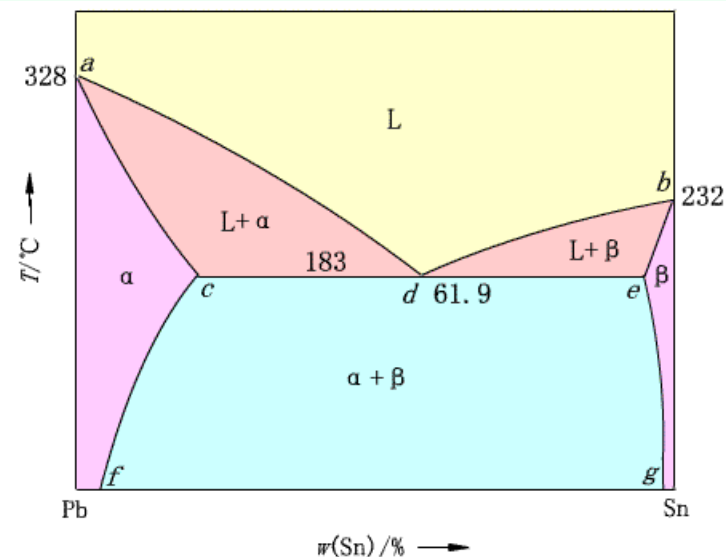
2.1 二元合金的结晶

d 点为共晶点, 表示 d 点成分(共晶成分)的液相合金冷却到 d 点温度(共晶温度)时, 共同结晶出 c 点成分的 α 相和 e 点成分的 β 相。



共晶反应: 一种液相在恒温下同时结晶出两种固相的反应, 生成的两相混合物叫**共晶体**。

发生共晶反应时三相共存, 三相各自成分确定, 恒温进行。



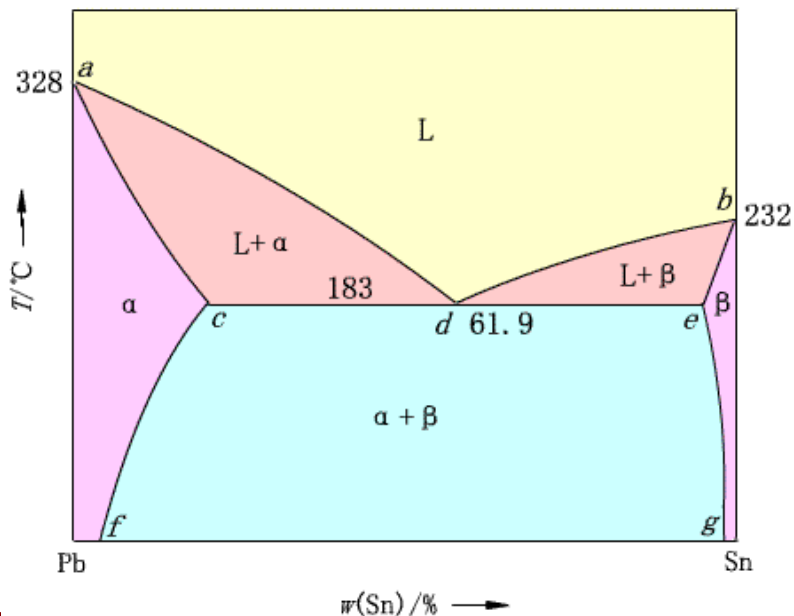
Pb-Sn合金相图



水平线 cde 为共晶反应线, 成分在 ce 之间的合金平衡结晶时都会发生共晶反应。

**cf 线为 Sn 在 Pb 中的溶解度线 (α 相的固溶线)。
Sn 含量大于 f 点的合金从高温冷却到室温时, 从 α 相中析出 β 相, 叫二次 β : $\alpha \rightarrow \beta_{II}$ 。**

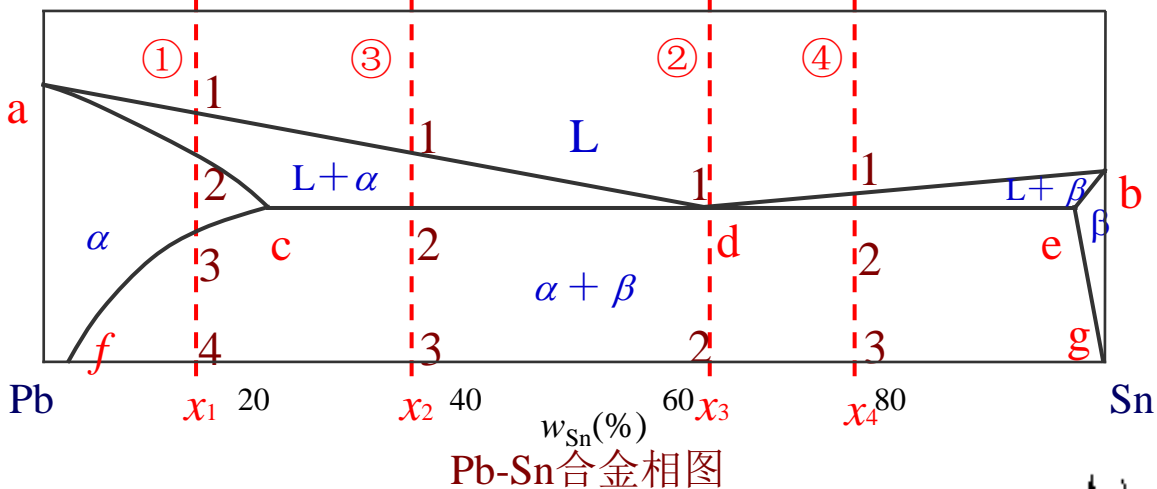
eg 线为 Pb 在 Sn 中溶解度线。Sn 含量小 g 点的合金, 冷却过程中同样发生二次结晶, 析出二次 α 。



2.1 二元合金的结晶

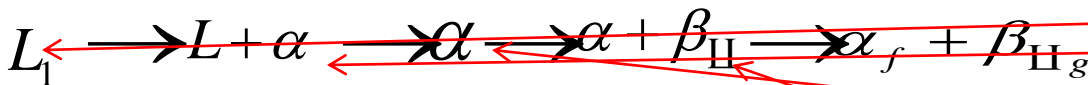
二元合金的结晶

② 共晶相图 (eutectic phase diagram)

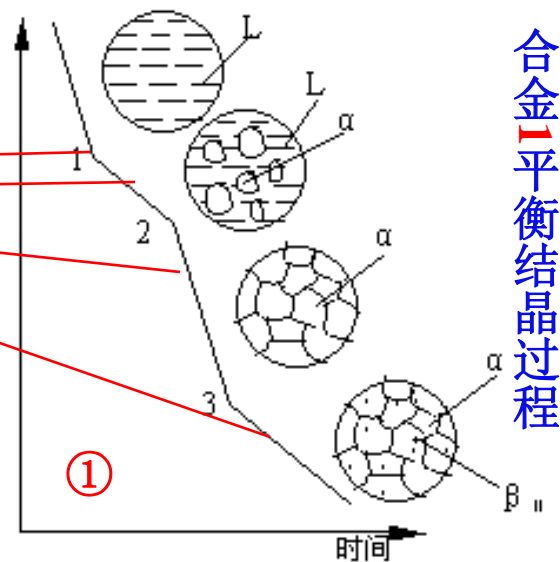


合金室温组织
为 $\alpha + \beta_{II}$ 。
其组成相是： f
点成分的 α 相，
 g 点成分的 β 相。

结晶过程相的转变



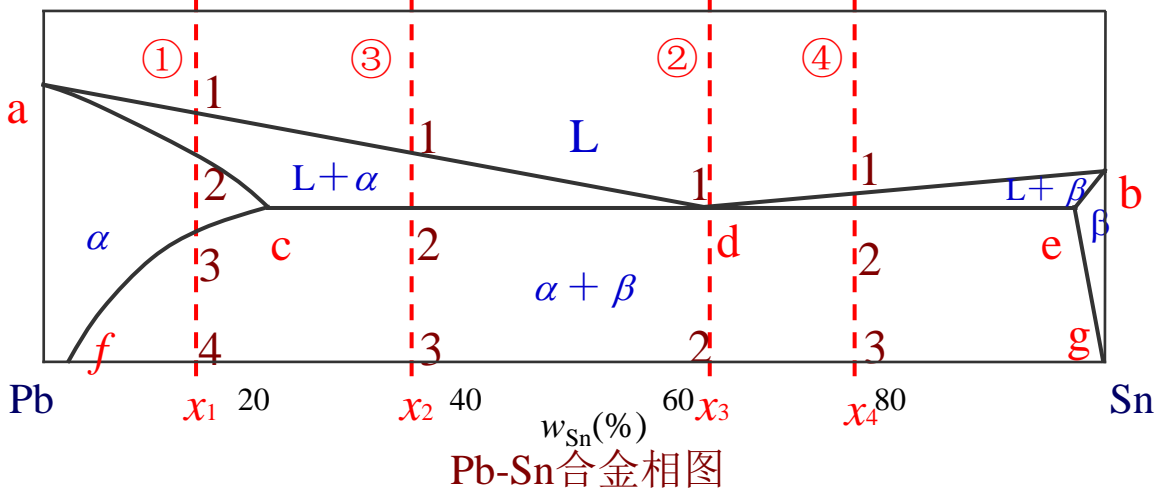
组织组成物： α 和 β_{II}



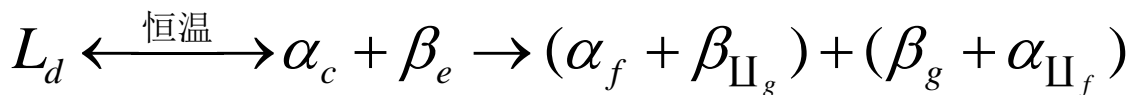
2.1 二元合金的结晶

二元合金的结晶

② 共晶相图 (eutectic phase diagram)

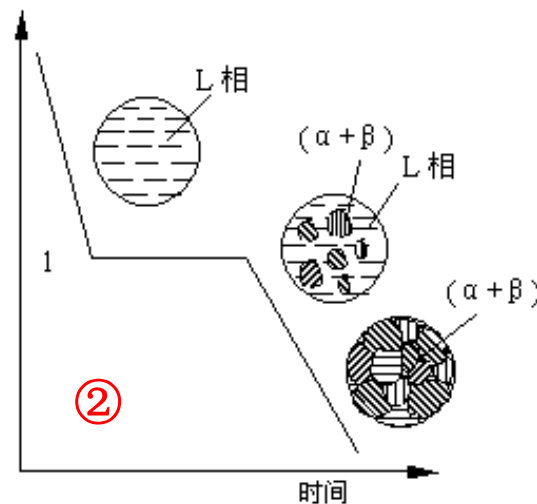


结晶过程相的转变



组织组成物: 共晶体 ($\alpha + \beta$)

组成相: α 相和 β 相

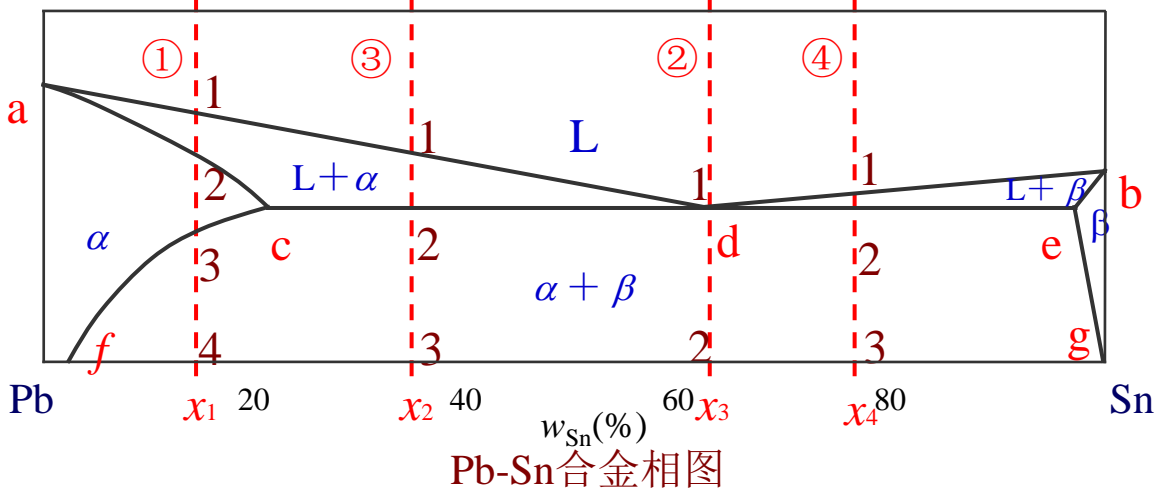


共晶合金平衡结晶过程

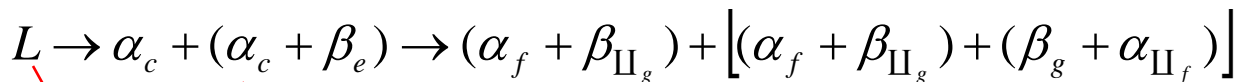
2.1 二元合金的结晶

二元合金的结晶

②共晶相图 (eutectic phase diagram)

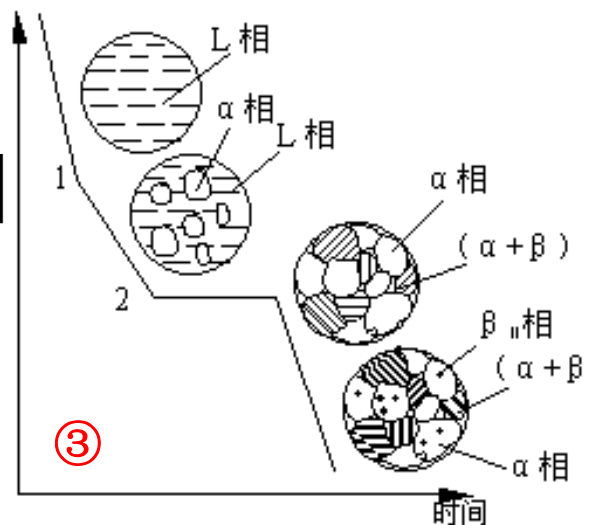


结晶过程相的转变



组织组成物: α 和 β 和共晶体 ($\alpha + \beta$)

组成相: α 相和 β 相

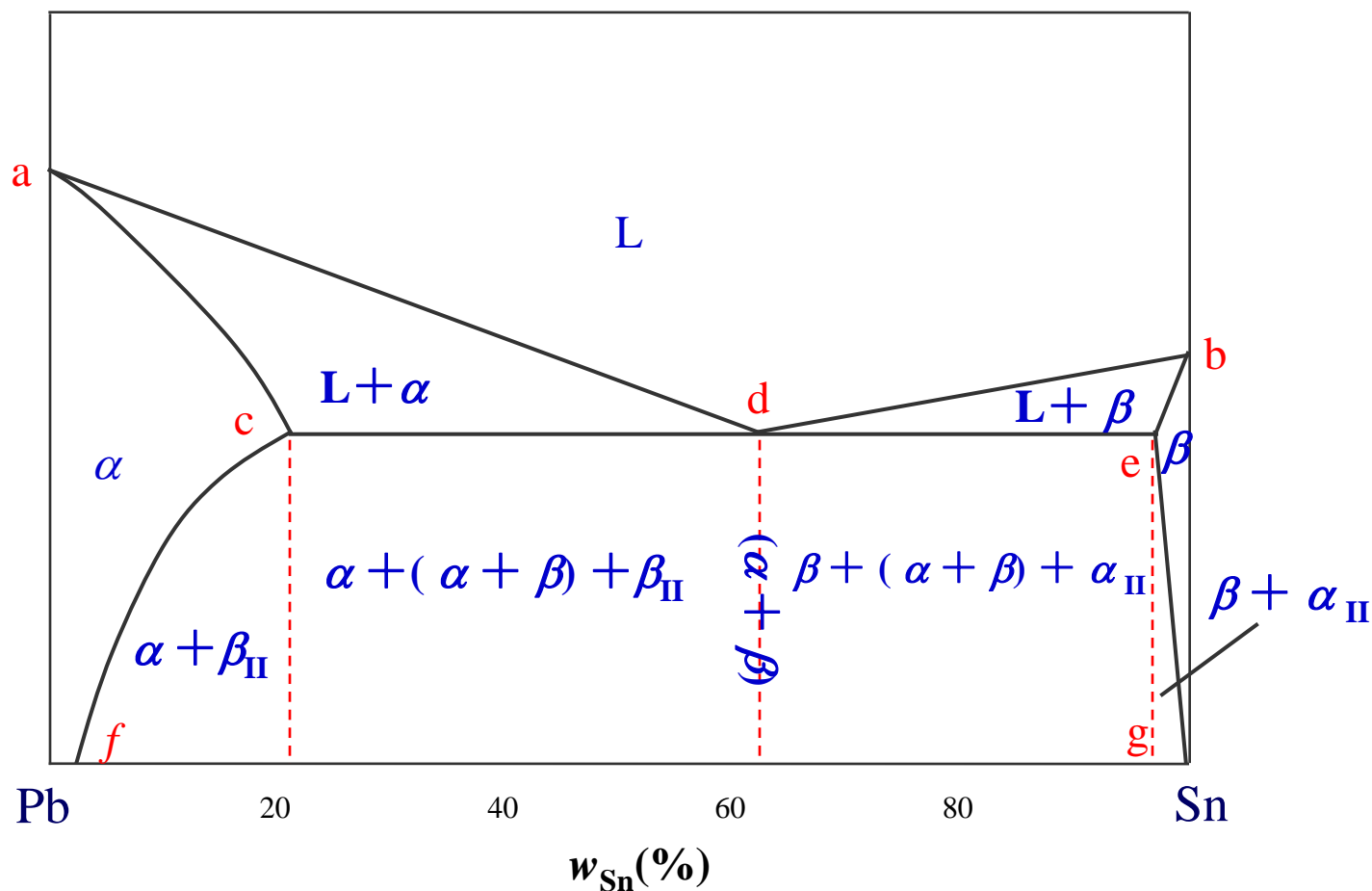


亚共晶合金平衡结晶过程

2.1 二元合金的结晶

二元合金的结晶

②共晶相图 (eutectic phase diagram)

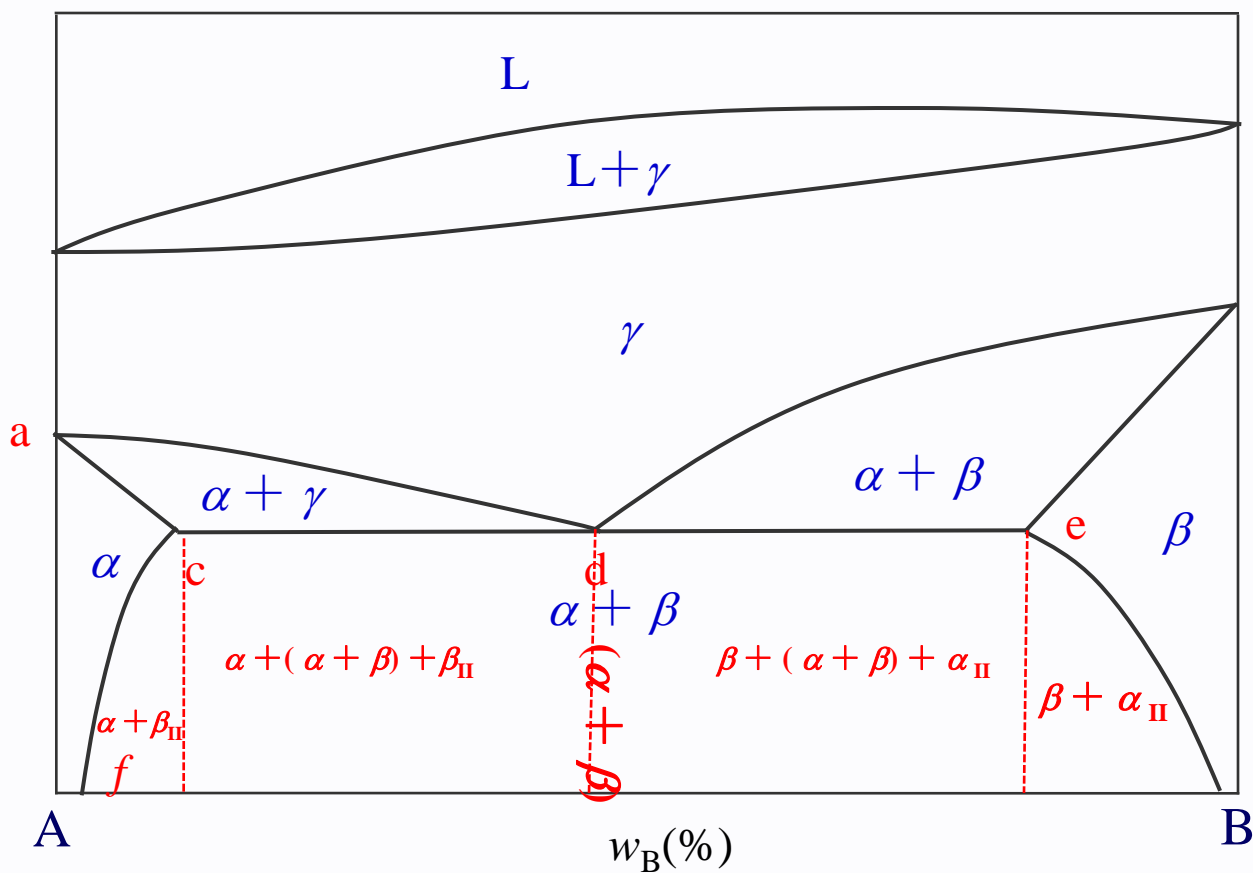


按组织组成物填写的Pb-Sn合金相图

2.1 二元合金的结晶

二元合金的结晶

④ 共析相图 (eutectoid phase diagram)



共析点: d

共析线: ce

共析反应: $\gamma_d \xrightleftharpoons{\text{恒温}} \alpha_c + \beta_e$

共析相图

2.2 合金的性能与相图关系

纯组元、共晶成分的合金流动性能最好，缩孔集中，**铸造**性能好。

铸造合金常选共晶成分或接近共晶的成分。

单相合金的**锻造**性能好。

2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

铁碳相图

铁碳合金：以铁和碳为基本组元的合金。

两大类铁碳合金：

铁碳合金 { 碳钢 (C% < 2.11%)
 { 铸铁 (C% > 2.11%)

碳在铁碳合金中的存在形式：

- ① 溶入Fe的晶格间隙中形成间隙固溶体（铁素体、奥氏体）；
- ② C与Fe作用形成化合物（Fe₃C等，本节讨论Fe-Fe₃C相图）；
- ③ 以游离态（石墨）存在。

铁碳相图：

1. 掌握各区域的相、组织组成物（形态、性能、特点）。
2. 掌握关键点、线上的相转变。

2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

Fe-Fe₃C相图中个点的温度、碳质量分数及含义

符号	温度/°C	C%	说 明
A	1538	0	纯铁的熔点
B	1495	0.53	包晶转变时液态合金的成分 (C%)
C	1148	4.3	共晶点
D	1227	6.69	渗碳体的熔点
E	1148	2.11	碳在 γ -Fe中的最大溶解度
F	1148	6.69	渗碳体的成分
G	912	0	α -Fe \leftrightarrow γ -Fe的转变温度 (A_3)
H	1495	0.09	碳在 δ -Fe中的最大溶解度
J	1495	0.17	包晶点
K	727	6.69	渗碳体的成分
N	1394	0	γ -Fe \leftrightarrow δ -Fe的转变温度 (A_4)
P	727	0.0218	碳在 α -Fe中的最大溶解度
S	727	0.77	共析点 (A_1)
Q	600	0.0057	600°C时碳在 α -Fe中的溶解度
室温		0.0008	

2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

铁碳相图

① 铁碳合金的组元

Fe: 强度低、硬度低、塑性好

Fe₃C (渗碳体 cementite): Fe₃C是Fe与C的一种具有复杂结构的间隙化合物，脆而硬，几乎无塑性。

② 铁碳合金的相

液相L: 铁与碳的液溶体。

δ相 (高温铁素体):

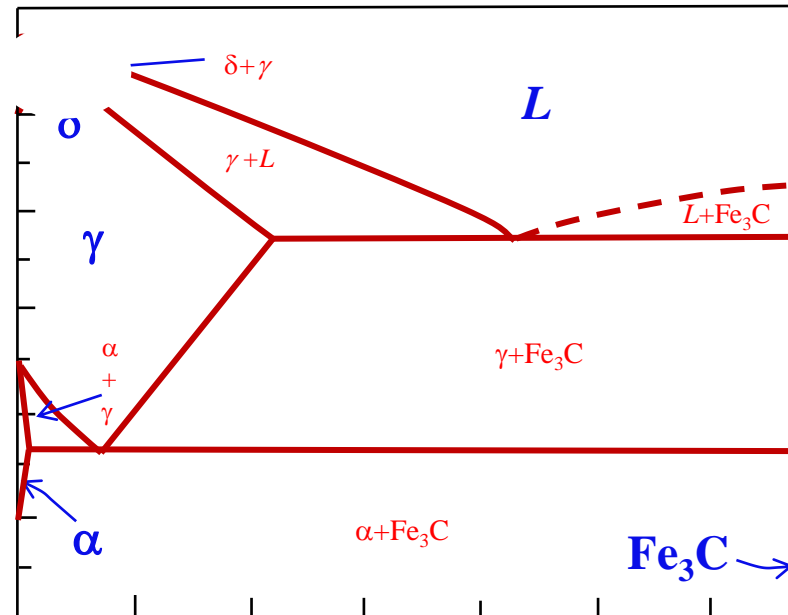
碳在δ-Fe中的间隙固溶体, 体心立方晶格。

γ相 (奥氏体 austenite, A, γ):

面心立方晶格; 强度较低、硬度不高、易于塑性变形。

α相 (铁素体 ferrite, F, α):

体心立晶格; 强度低、硬度低、塑性好。

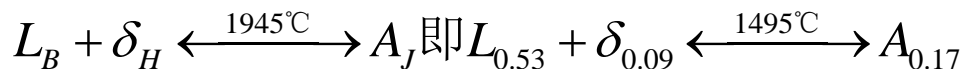


2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

铁碳相图

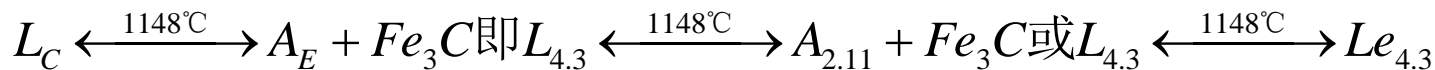
③重要的点、线

J点:包晶点

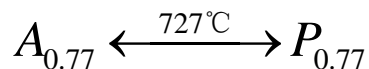
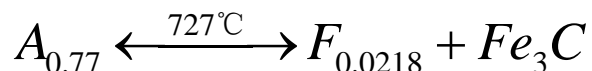


点H、E、P?

C点:共晶点(莱氏体 *ledeburite*)



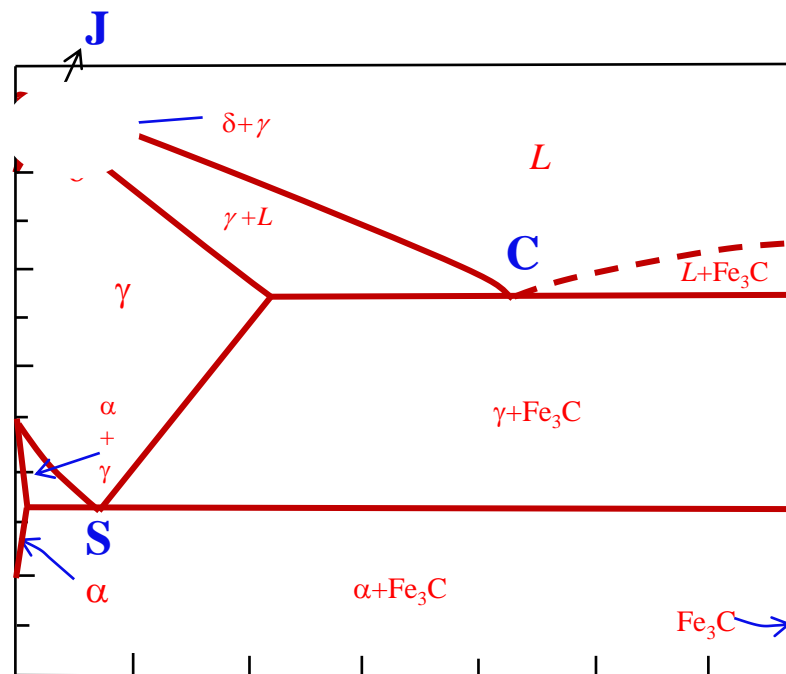
S点:共析点(珠光体 *pearlite*)



莱氏体(Le): 块状或粒状A分布在 Fe_3C 集体上。

珠光体(P):

层片状; 塑性、韧性、硬度介于渗碳体和铁素体之间。



2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

铁碳相图

③重要的点、线

液相、固相线

液相线: ABCD 固相线: AHJECF

三条水平线

HJB线:包晶线 (1495°C), 包晶反应。

ECF线:共晶线 (1148°C), 共晶反应。

PSK线:共析线 (727°C), 共析反应, 又称**A₁线**。

三条固相转变线

GS线

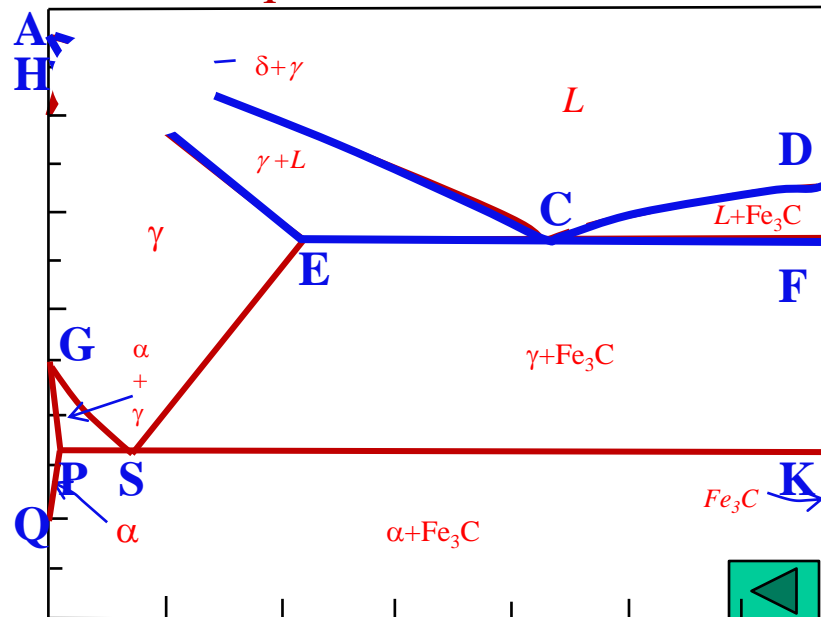
$\gamma \rightleftharpoons \alpha$ 转变温度线, 又标记为**A₃线**

ES线

碳在奥氏体 (γ) 中的固溶度曲线, 又标记为**A_{cm}线** $\gamma \rightleftharpoons \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$

PQ线

碳在铁素体 (α) 中的固溶度曲线, 析出**Fe₃C_{III}**



2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

铁碳相图

③重要的点、线

五种形态不同的渗碳体:

共晶渗碳体: 共晶反应中生成的渗碳体。

共析渗碳体: 共析反应中生成的渗碳体。

一次渗碳体 ($\text{Fe}_3\text{C}_\text{I}$): 从液相中析出的渗碳体。

二次渗碳体 ($\text{Fe}_3\text{C}_\text{II}$): 从奥氏体中析出的渗碳体。

三次渗碳体 ($\text{Fe}_3\text{C}_\text{III}$): 从铁素体中析出的渗碳体。

2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

铁碳合金平衡结晶过程

根据Fe-Fe₃C相图, 铁碳合金可分为三类:

工业纯铁[$w(\text{C}) \leq 0.0218\%$]

钢[$0.0218\% < w(\text{C}) \leq 2.11\%$]

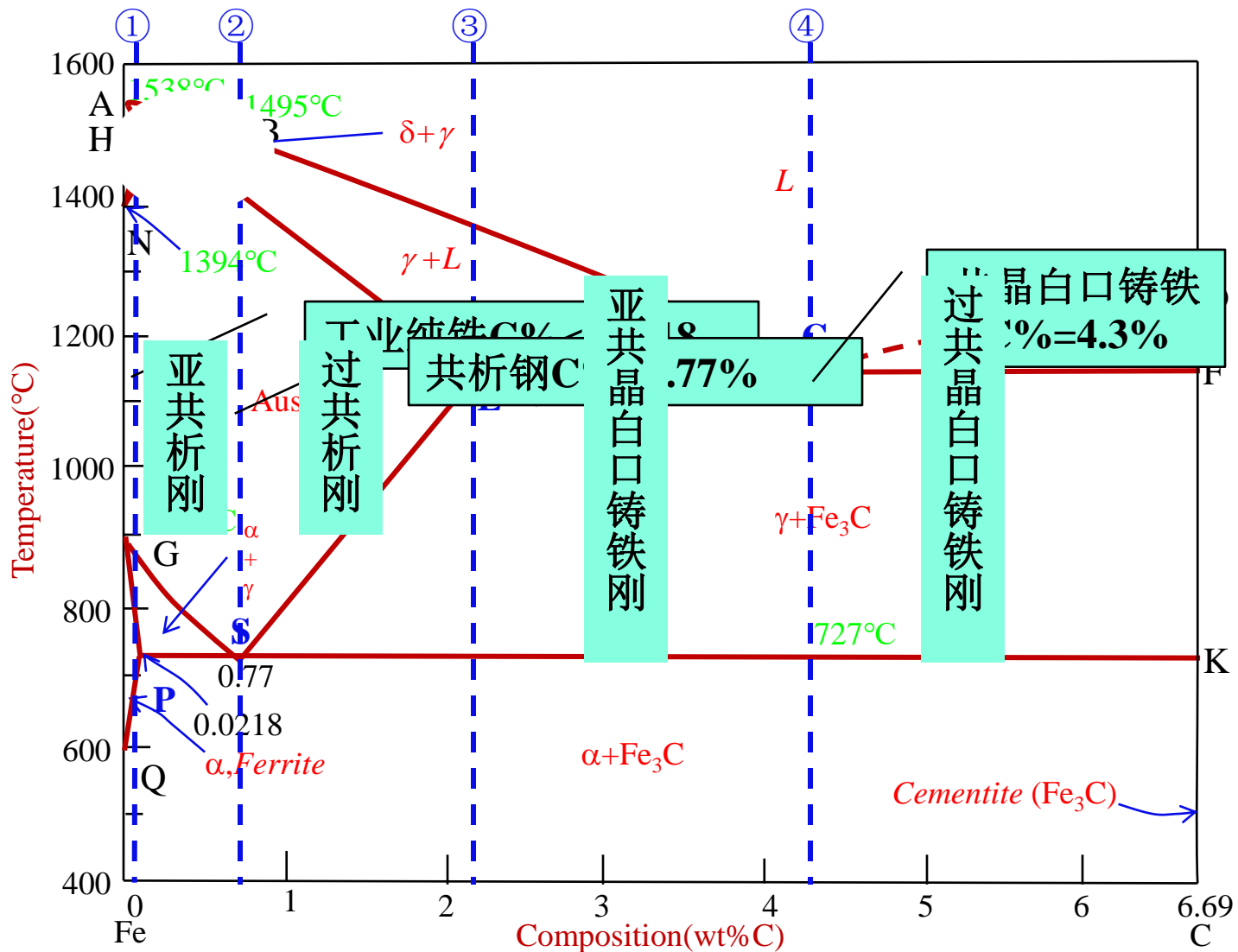
- 亚共析钢[$0.0218\% < w(\text{C}) < 0.77\%$]
- 共析钢[$w(\text{C}) = 0.77\%$]
- 过共析钢[$0.77\% < w(\text{C}) \leq 2.11\%$]

白口铸铁[$2.11\% < w(\text{C}) < 6.69\%$]

- 亚共晶白口铸铁[$2.11\% < w(\text{C}) < 4.3\%$]
- 共晶白口铸铁[$w(\text{C}) = 4.3\%$]
- 过共晶白口铸铁[$4.3\% < w(\text{C}) < 6.69\%$]

2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

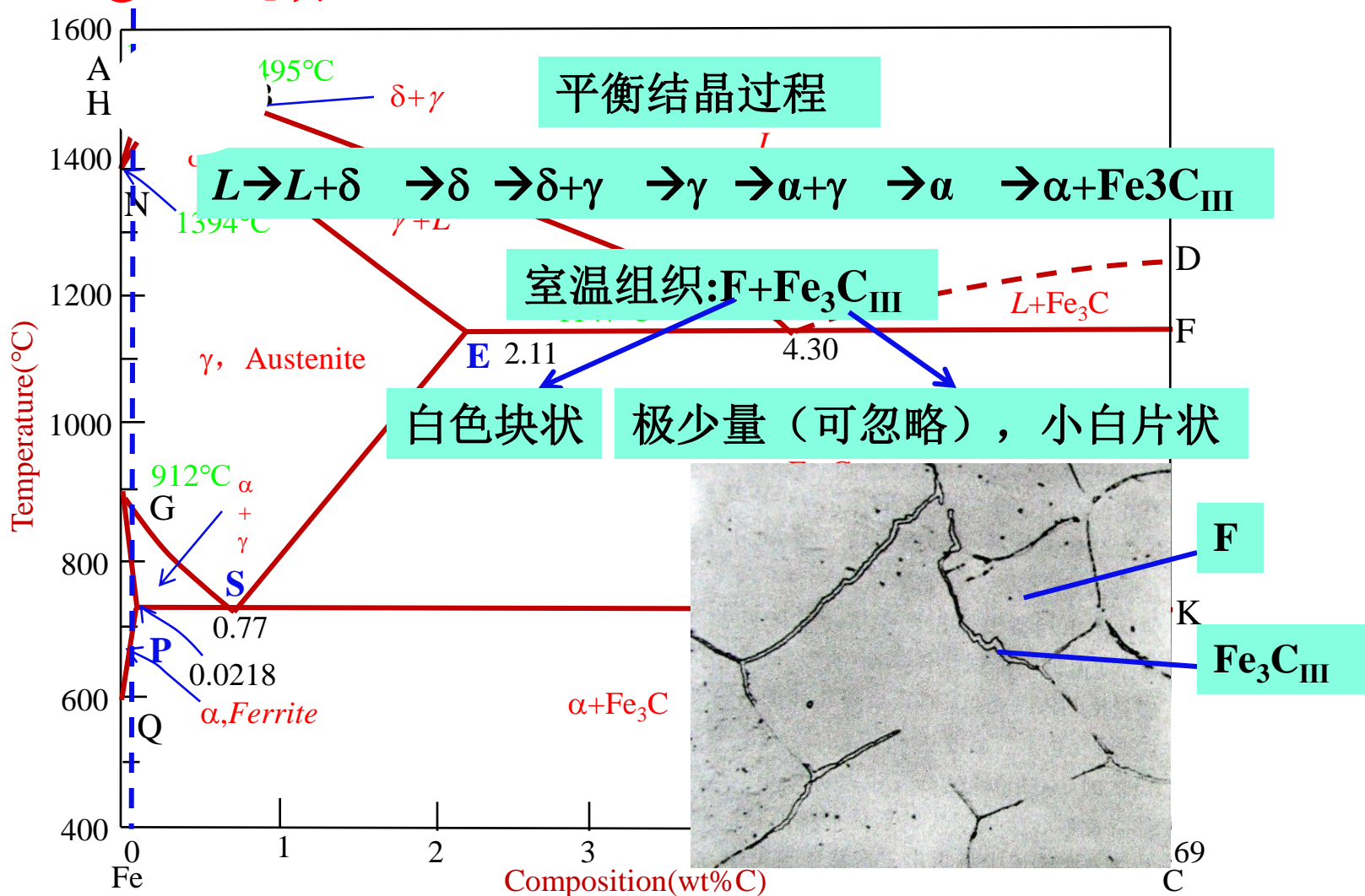
铁碳合金平衡结晶过程



2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

铁碳合金平衡结晶过程

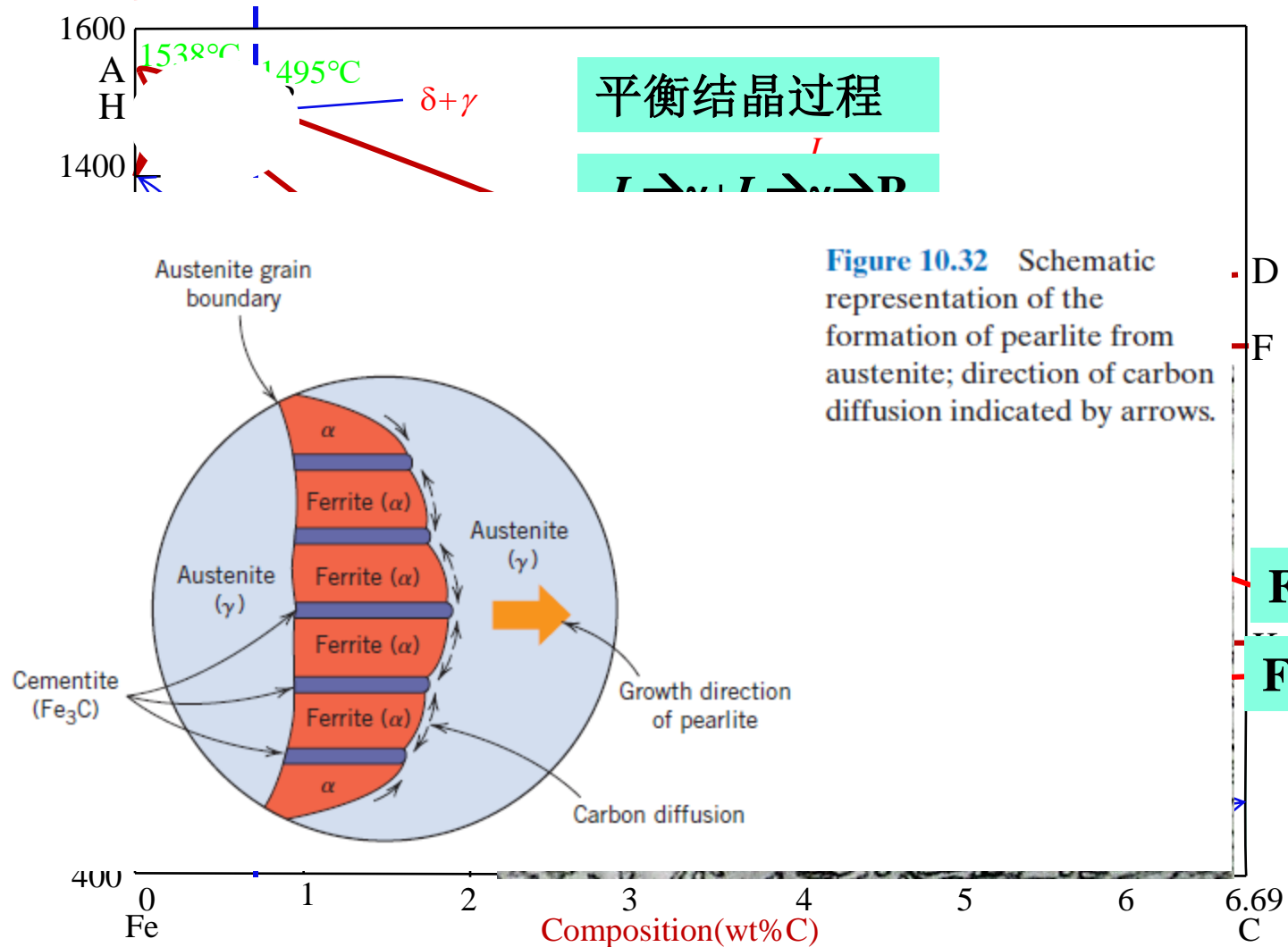
① 工业纯铁



2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

铁碳合金平衡结晶过程

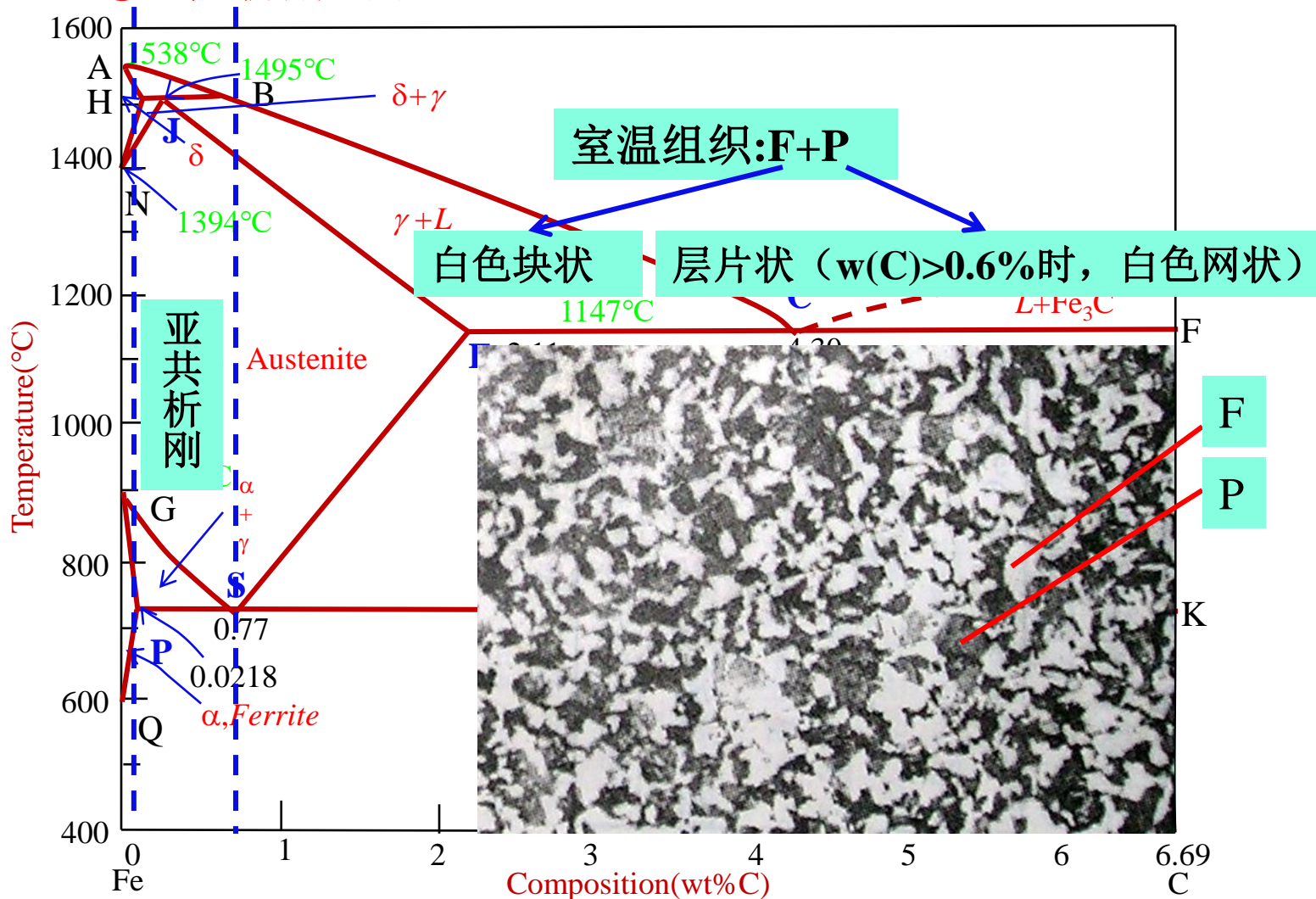
② 共析钢 $w(C)=0.77\%$



2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

铁碳合金平衡结晶过程

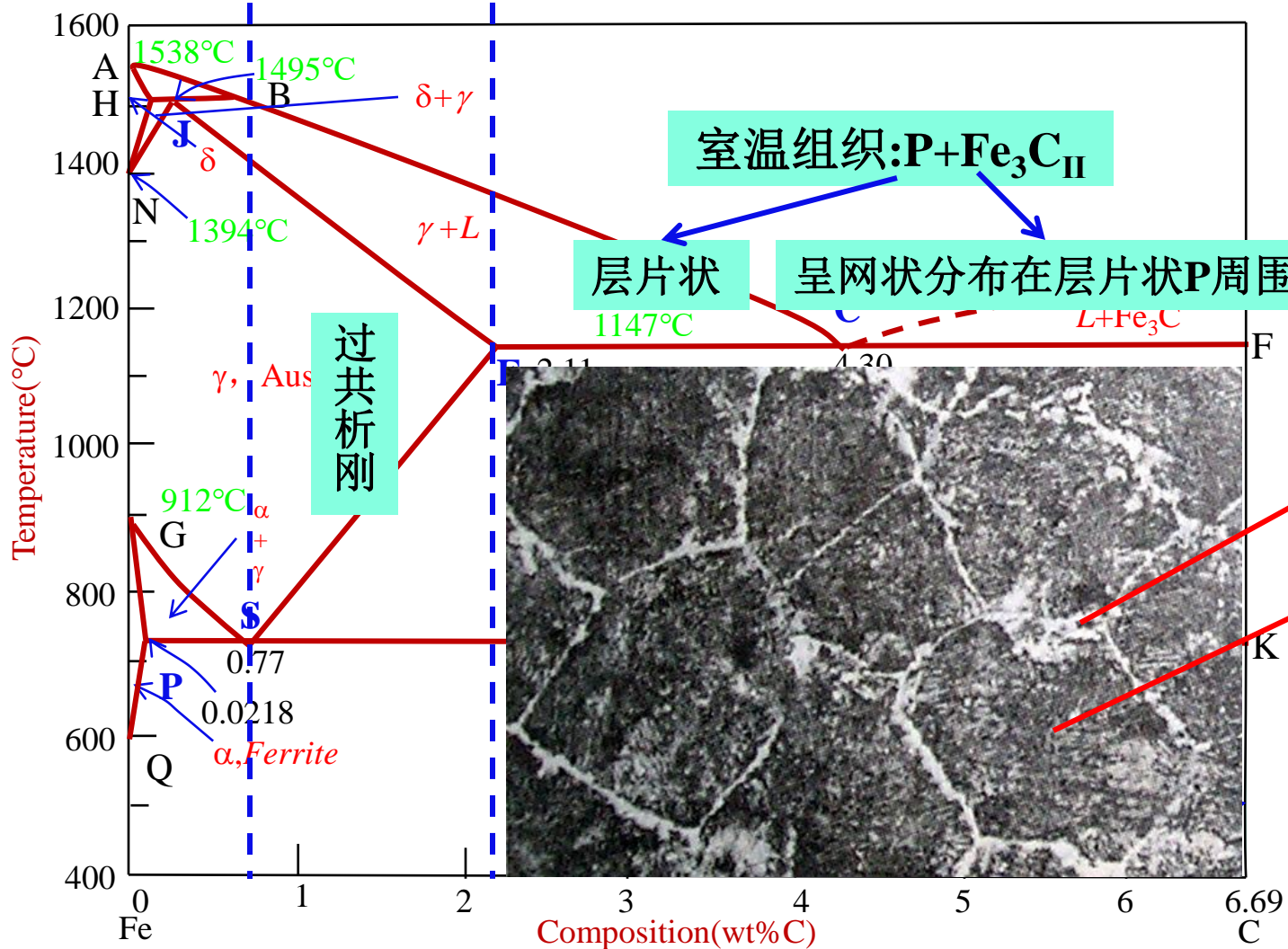
③亚共析钢 $w(C)=0.0218\% - 0.77\%$



2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

铁碳合金平衡结晶过程

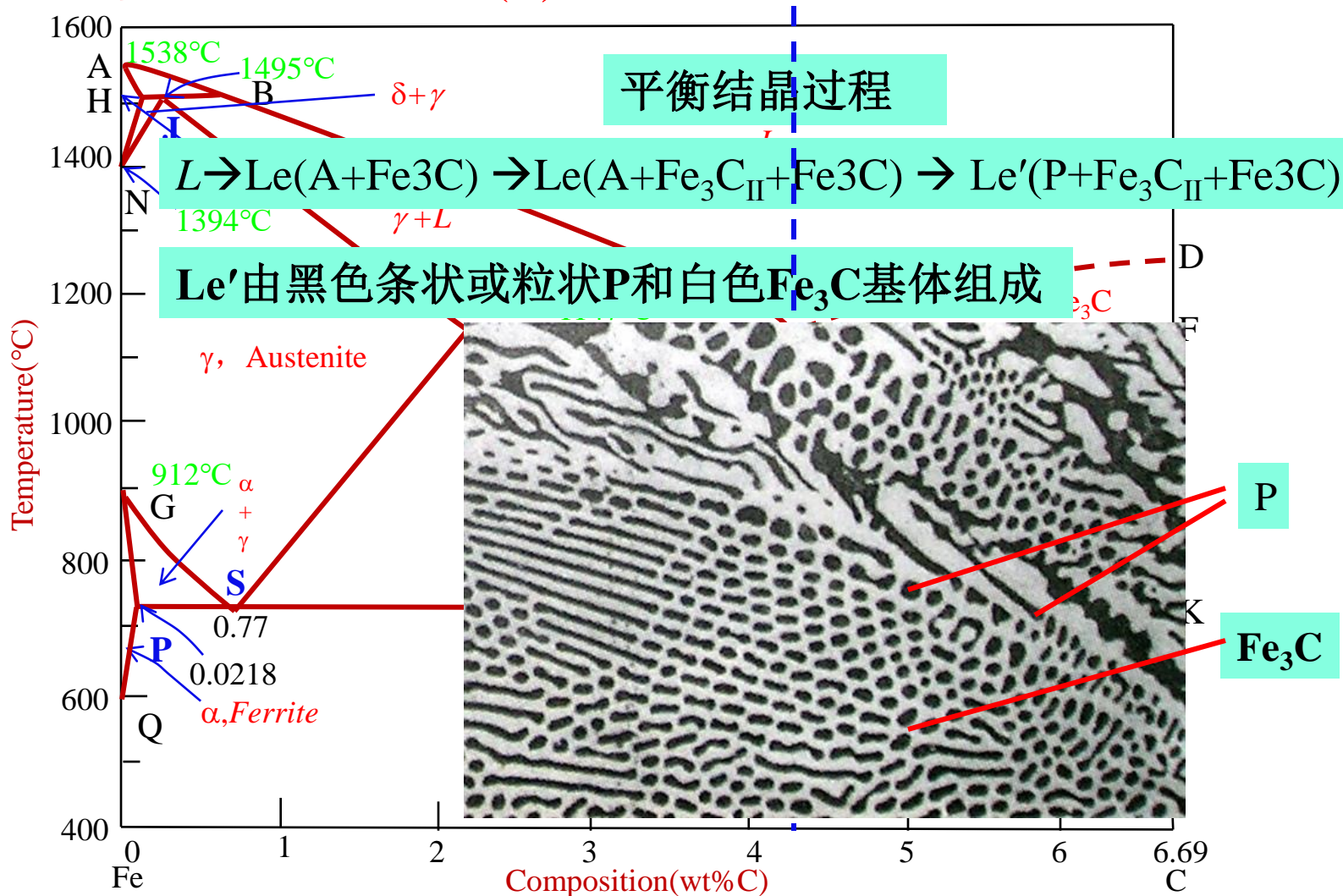
④ 过共析钢 ($0.77\% < w(C) \leq 2.11\%$)



2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

铁碳合金平衡结晶过程

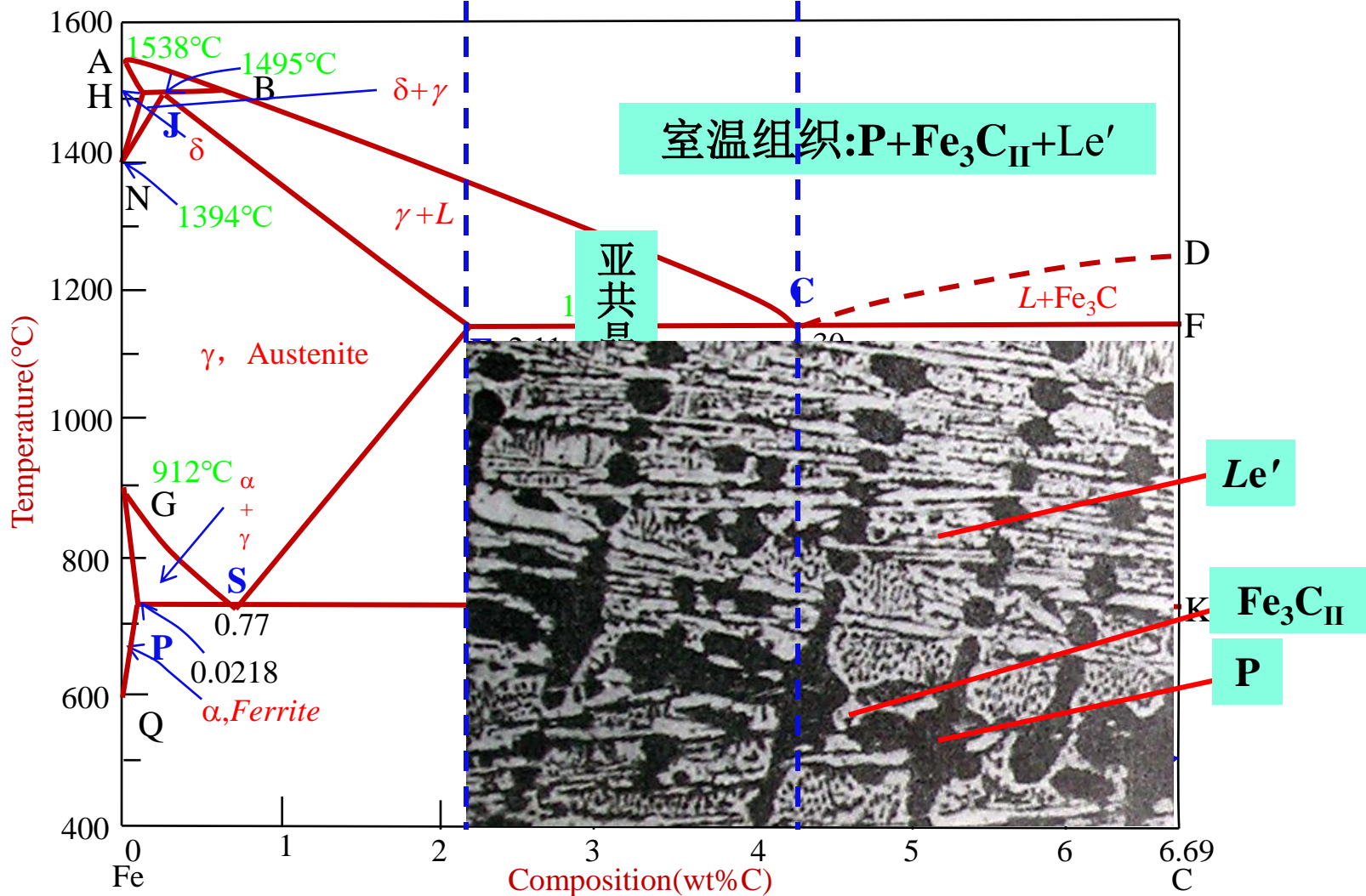
⑤ 共晶白口铸铁 ($w(\text{C}) = 4.3\%$)



2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

铁碳合金平衡结晶过程

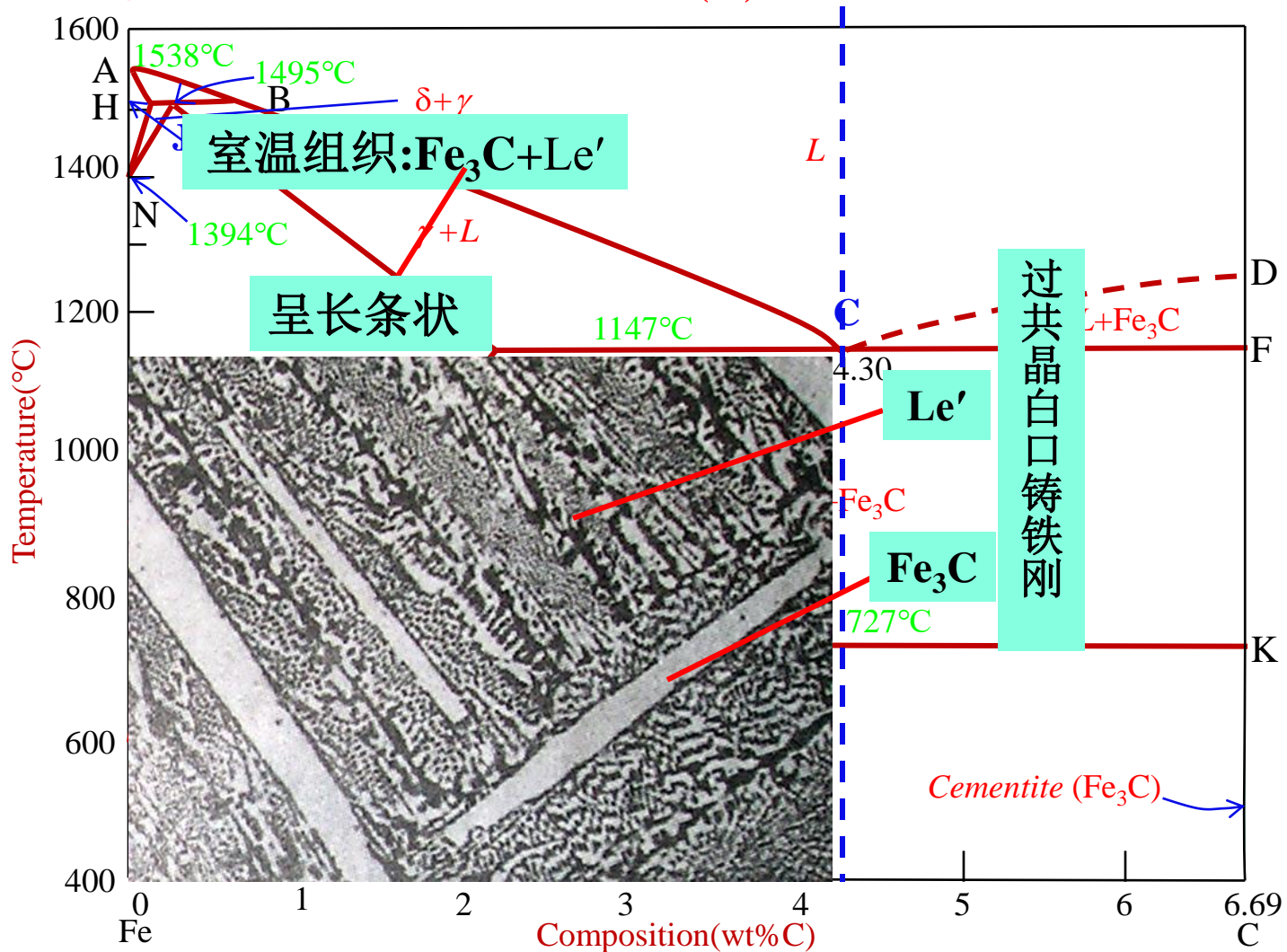
⑥ 亚共晶白口铸铁 ($2.11\% < w(C) < 4.3\%$)



2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

铁碳合金平衡结晶过程

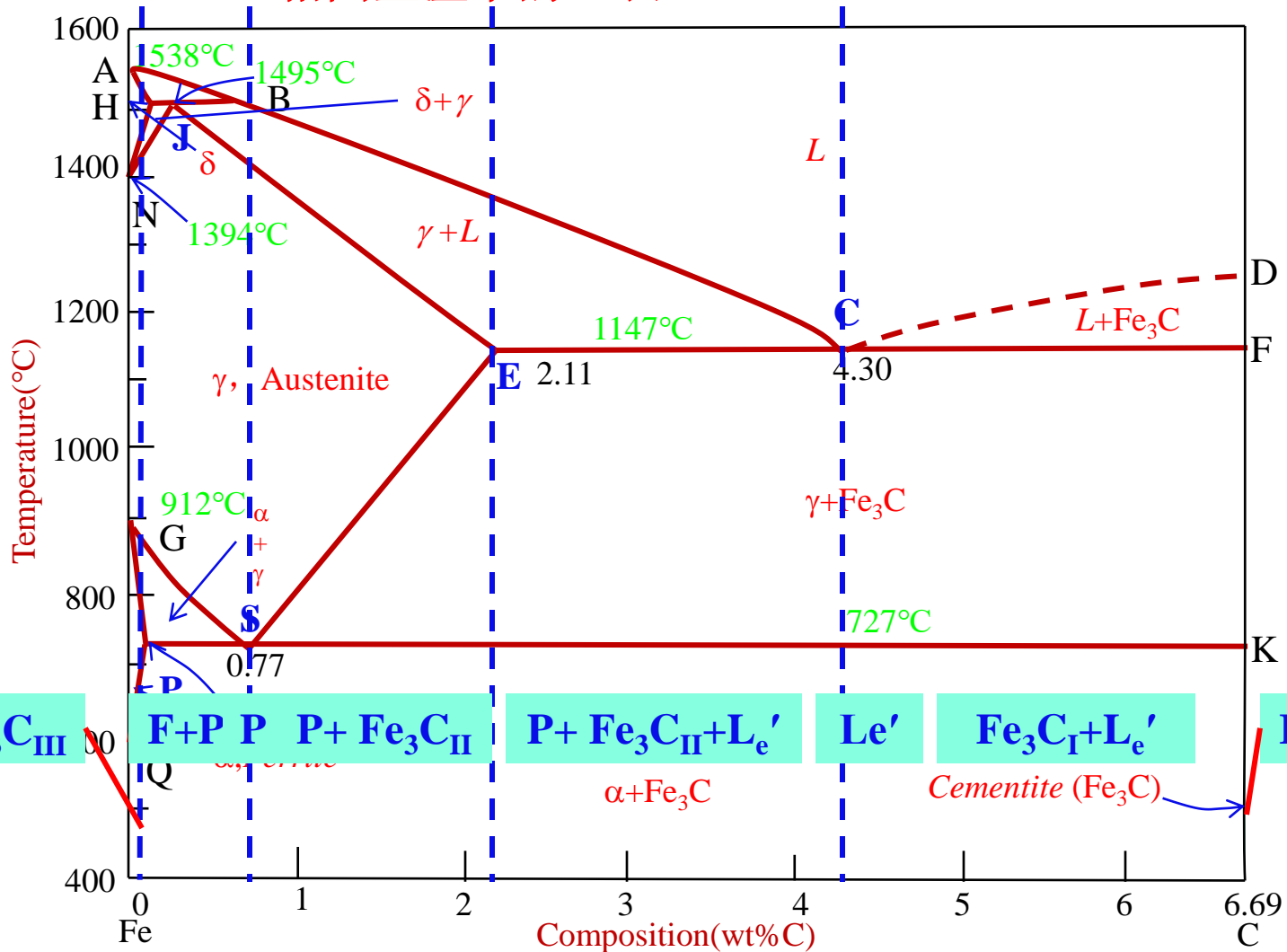
⑦ 过共晶白口铸铁 ($4.3\% < w(C) < 6.69\%$)



2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

铁碳合金平衡结晶过程

Fe-Fe₃C相图室温下的组织



2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

含碳量对铁碳合金组织和性能的影响

① 平衡组织的影响

对相组成物影响 (F和 Fe_3C)

随C%升高, F的相对量减少, Fe_3C 的相对量增多。

对组织组成物影响 (F、F+P、P、P+ $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ 、P+ $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ +Le'、Le'、Le'+ $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{I}}$ 、 Fe_3C)

随C%升高, F的相对量减少, $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{I}}$ 的相对量增多, 其余组织的相对量在达到其特性成分点时达到最大值。

② 力学性能的影响

铁素体 (F) : 软韧相; 渗碳体 (Fe_3C) : 硬脆相。

对硬度的影响 随C%升高, 硬度逐渐增大。

对强度的影响 随C%升高, 强度先增大、后降低。

对塑性和韧性的影响 随C%升高, 塑性和韧性降低。

③ 工艺性能的影响

对切削加工性的影响 中碳钢的切削加工性能最好。

对可锻性的影响 低碳钢比高碳钢的可锻性好 (奥氏体区)。

对铸造性的影响 共晶点附近的铸铁铸造性好。

对焊接性的影响 低碳钢比高碳钢的焊接性好。

2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

铁碳相图的工程应用

1. 在钢铁材料选用方面的应用

- 纯铁
- 钢
- 白口铸铁

硬度高、脆性大，不能切削加工，不能锻造，但耐磨性好，铸造性能优良，适用于作要求耐磨、不受冲击、形状复杂的铸件。

如拔丝模、冷轧辊、货车轮、犁铧、球磨机的磨球等。

2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

铁碳相图的工程应用

2.在铸造工艺方面的应用

根据Fe- Fe₃C相图确定合金浇注温度。浇注温度一般在液相线以上50 °C ~ 100 °C。

纯铁和共晶白口铸铁的铸造性能最好,凝固温度区间最小,流动性好,分散缩孔少,可以获得致密的铸件。铸铁在生产上总是选在共晶成分附近。

铸钢的碳质量分数在0.15-0.6%之间,钢的结晶温度区间较小,铸造性能较好。

2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

铁碳相图的工程应用

3. 在热锻、热轧工艺方面的应用

钢处于奥氏体状态时强度较低, 塑性较好, 因此锻造或轧制选在单相奥氏体区进行。

一般始锻、始轧温度控制在固相线以下 $100\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内。

一般始锻温度为 $1150\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

终锻温度为 $750\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

铁碳相图的工程应用

4. 在热处理工艺方面的应用

Fe-Fe₃C相图对于制订热处理工艺有着特别重要的意义。

热处理工艺如退火、正火、淬火的加热温度都依据Fe- Fe₃C相图确定。

在热处理一节中详细阐述。

2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

特别提示

① Fe-Fe₃C相图只反映铁碳二元合金中相的平衡状态, 如含有其它元素, 相图将发生变化。

② Fe-Fe₃C相图反映的是平衡条件下铁碳合金中相的状态, 若冷却或加热速度较快时, 其组织转变就不能只用相图来分析。

2.3 铁碳合金的结晶 (重点)

名词解释小结

铁素体(F, ferrite): 也叫 α 相, 是碳在 α -Fe中的间隙固溶体, 呈体心立方晶格。

渗碳体 (Cm,cementite):
 Fe_3C , 一种金属化合物。

奥氏体(A,austenite): 也叫 γ 相, 是碳在 γ -Fe中的间隙固溶体, 呈面心立方晶格。

珠光体(P,pearlite): 铁素体与渗碳体的共析(两相)混合物。

高温莱氏体(Le,ledeburite): 奥氏体与渗碳体的共晶(两相)混合物。

低温莱氏体(Le'): 珠光体与渗碳体的混合物。

合金的结晶

本节小结

合金相图

匀晶相图、共晶相图、包晶相图、
共析相图、含有稳定化合物的相图

二元合金二相区结晶规律

变温结晶

两相的成分确定

温度一定时, 两相的质量符合杠杆定律。

铁碳合金的结晶

铁碳相图中的相: L、 δ 、 α 、 γ 、 Fe_3C

铁碳合金的组织: F、P+F、P、 $\text{P}+\text{Fe}_3\text{C}_{\parallel}$ 、
 $\text{P}+\text{Fe}_3\text{C}_{\parallel}+\text{Le}'$ 、 Le' 、 $\text{Fe}_3\text{C}_{\perp}+\text{Le}'$

3. 金属的塑性加工

两个方面的问题

1. 塑性变形

各种压力加工，如轧制、锻造、挤压、拉拔、冲压等，均能使金属发生塑性变形。

一般来说，金属在常温下发生的塑性变形是冷塑性变形。

金属发生冷塑性变形后，其内部组织、结构和性能均将发生变化，宏观性能表现为强度和硬度、电阻率升高，塑性和韧性、耐腐蚀性降低。

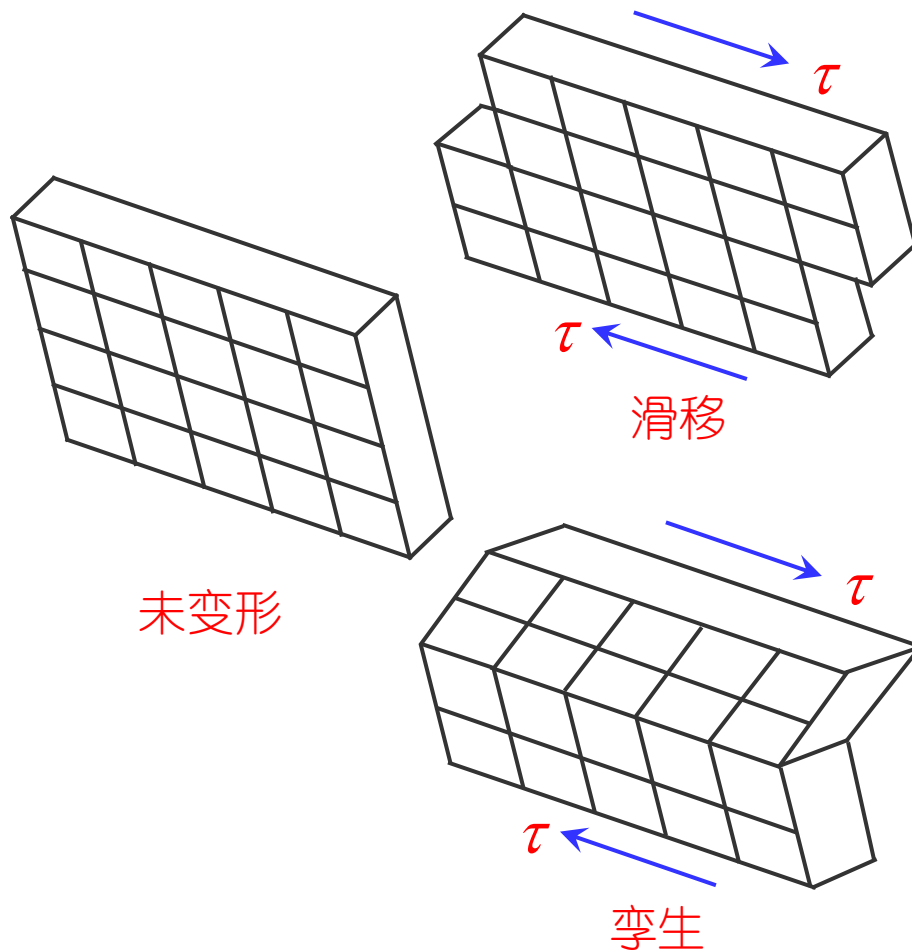
2. 回复与再结晶

经过冷塑性变形的金属被重新加热后，其内部组织、结构和性能又将发生变化，宏观性能表现为强度和硬度降低，塑性和韧性升高。

3.1 塑性变形

dislocation

两种方式：



滑移 (slip)：在切应力作用下，晶体的一部分沿一定的晶面和晶向相对于另一部分发生相对滑动位移的现象。

孪生 (twin)：在切应力作用下，晶体的一部分沿一定的晶面和晶向相对于另一部分发生对称切变的现象。

3.1 塑性变形

dislocation

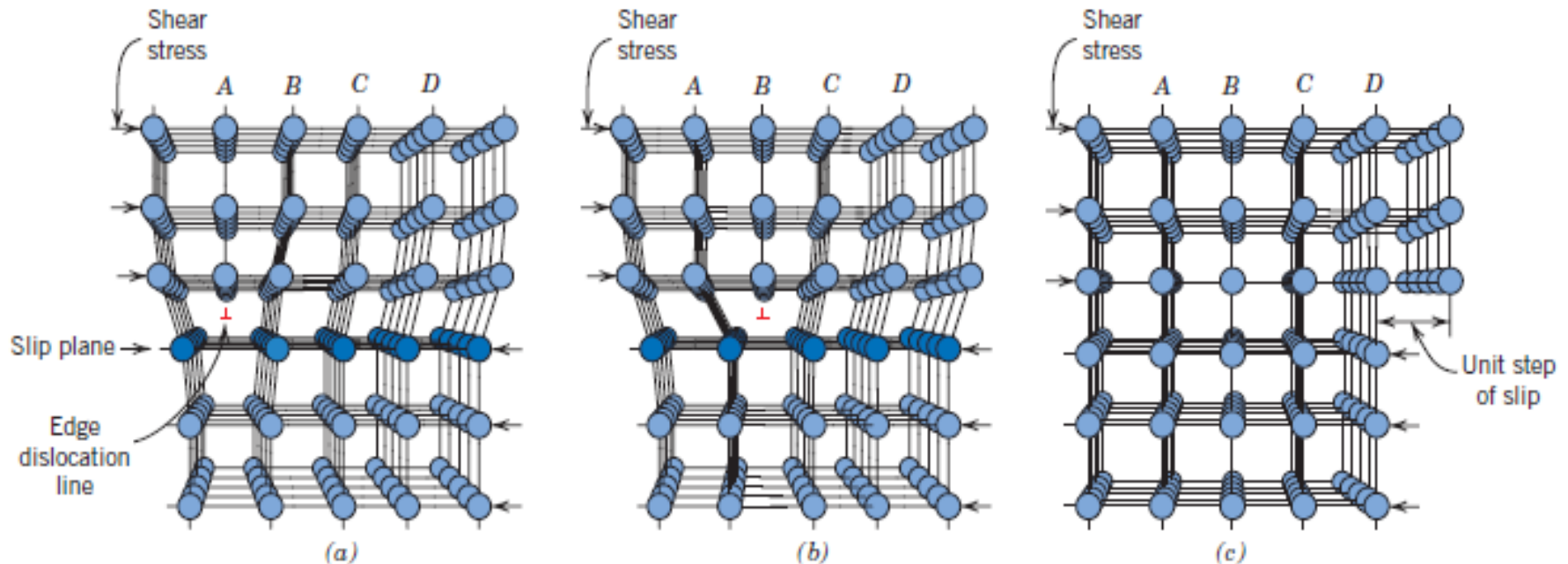


Figure 8.1 Atomic rearrangements that accompany the motion of an edge dislocation as it moves in response to an applied shear stress. (a) The extra half-plane of atoms is labeled A. (b) The dislocation moves one atomic distance to the right as A links up to the lower portion of plane B; in the process, the upper portion of B becomes the extra half-plane. (c) A step forms on the surface of the crystal as the extra half-plane exits. (Adapted from A. G. Guy, *Essentials of Materials Science*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1976, p. 153.)

3.1 塑性变形

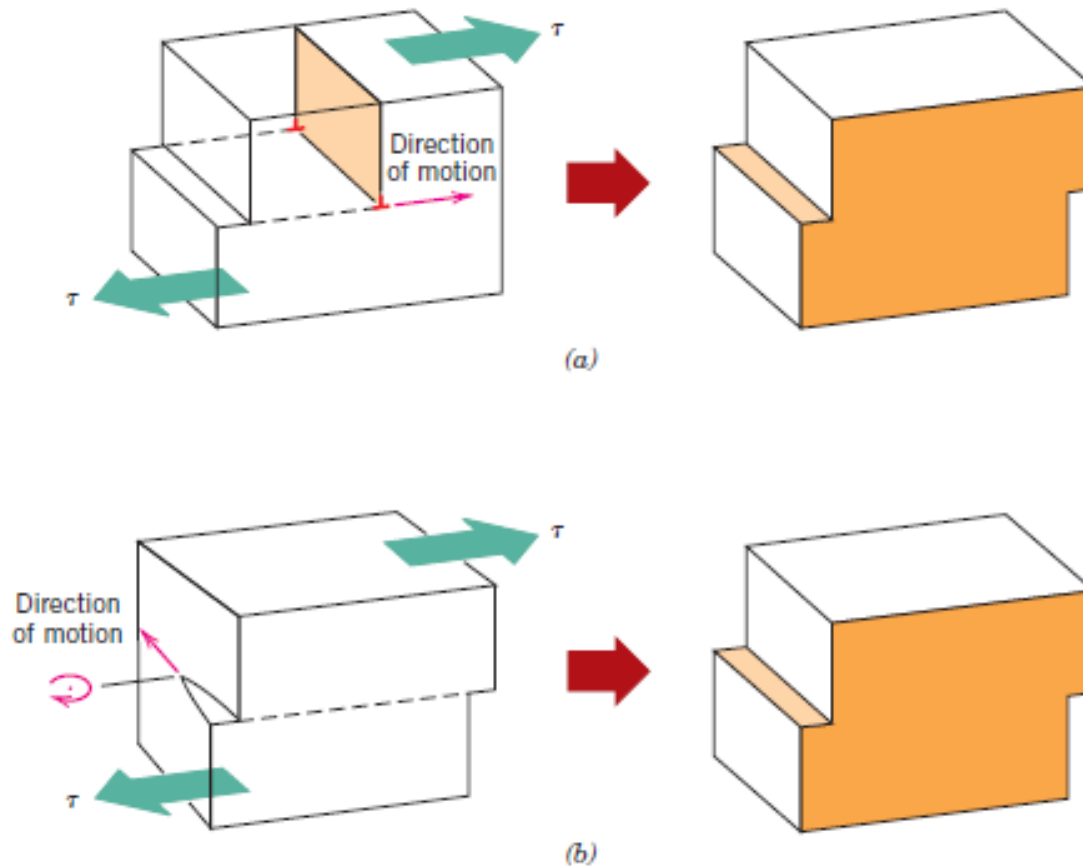


Figure 8.2 The formation of a step on the surface of a crystal by the motion of (a) an edge dislocation and (b) a screw dislocation. Note that for an edge, the dislocation line moves in the direction of the applied shear stress τ ; for a screw, the dislocation line motion is perpendicular to the stress direction. (Adapted from H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials, Vol. III, Mechanical Behavior*, p. 70. Copyright © 1965 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley

3.1 塑性变形

dislocation

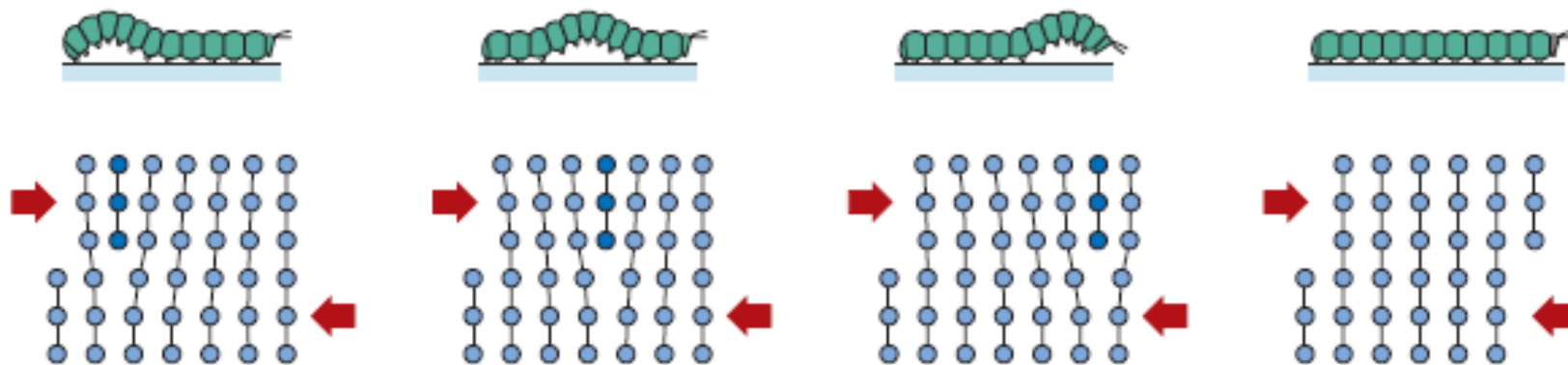


Figure 8.3 Representation of the analogy between caterpillar and dislocation motion.

位错滑移和毛虫移动

两个符合相同的两个位错位于同一个滑移面施加一个反向力

3.1 塑性变形

dislocation

紧邻位错线上部的原子受到挤压，压缩应变
位错线左右的晶格受到压应力

多个半个原子面，周围的原子受到拉伸、压缩和剪切的晶格应变

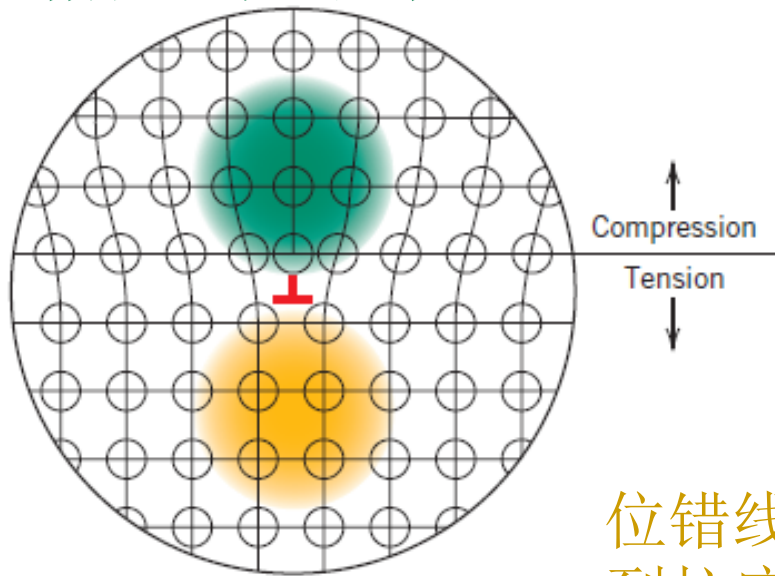
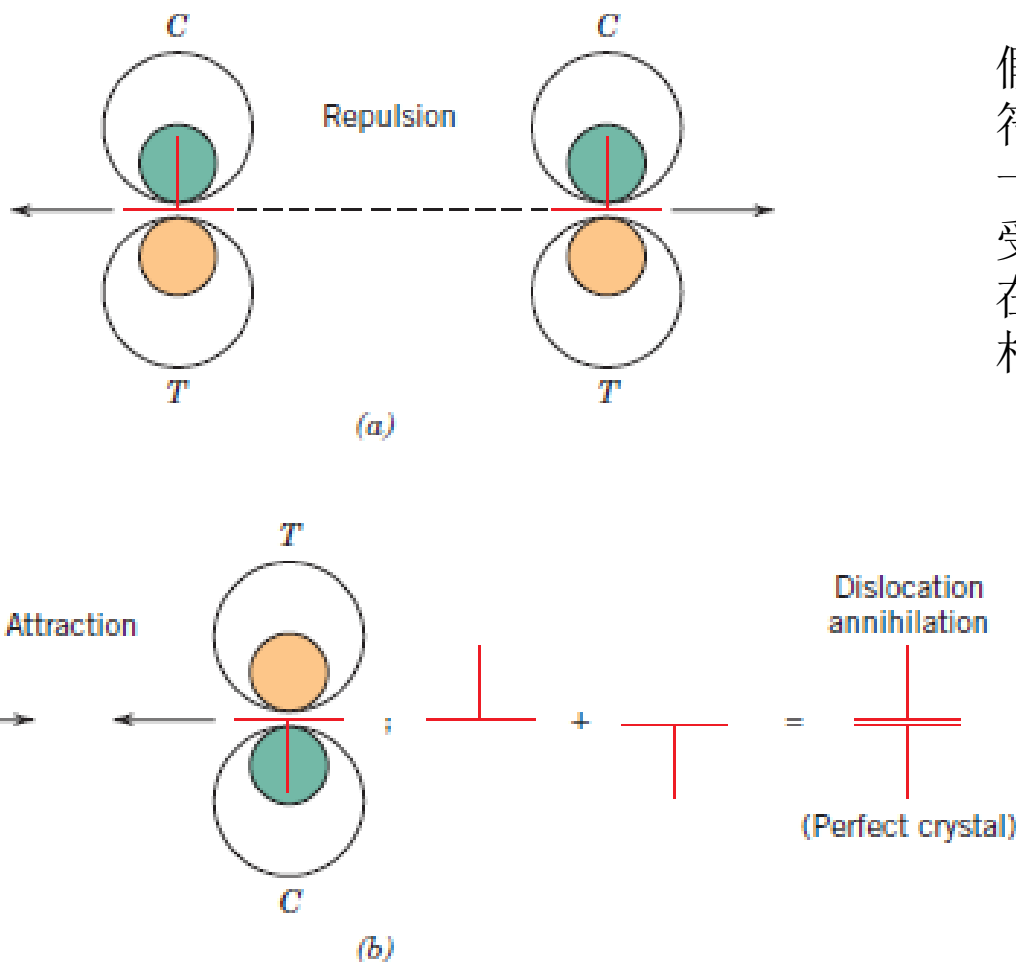


Figure 8.4 Regions of compression (green) and tension (yellow) located around an edge dislocation. (Adapted from W. G. Moffatt, G. W. Pearsall, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. I, *Structure*, p. 85. Copyright © 1964 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

位错线下部的晶格受到拉应力



假设晶体结构上同时有两个符合相同的两个位错位于同一个滑移面。

受到拉伸或者压缩的应变场在同一侧。则两个位错受到相互排斥的力。

符合不同的两个位错位于同一个滑移面。压缩应力场和拉伸应力场在同一侧，则趋向于吸引，两个位错线合并变成无缺陷（位错消失）

Figure 8.5 (a) Two edge dislocations of the same sign and lying on the same slip plane exert a repulsive force on each other; *C* and *T* denote compression and tensile regions, respectively. (b) Edge dislocations of opposite sign and lying on the same slip plane exert an attractive force on each other. Upon meeting, they annihilate each other and leave a region of perfect crystal. (Adapted from H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*, p. 75. Copyright © 1965 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons.)

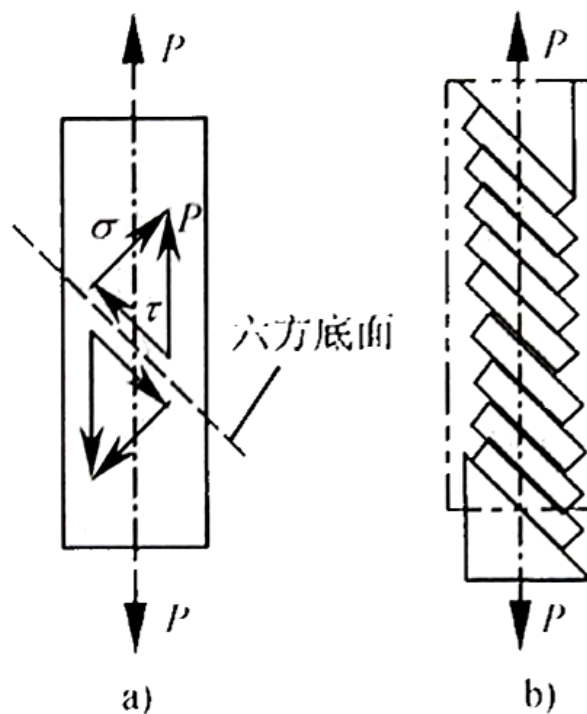
3.1 塑性变形

单晶体的塑性变形

滑移变形的特点

①滑移只能在切应力作用下才会发生

产生滑移所需的最小切应力称为临界切应力。



重要现象：

当外力与滑移所发生的晶面之间呈 45° 时，临界切应力最小，即当单晶体在外力作用下，呈 45° 角的晶面最容易产生滑移。

锌单晶体拉伸试验示意图

3.1 塑性变形

单晶体的塑性 滑移变形的特点

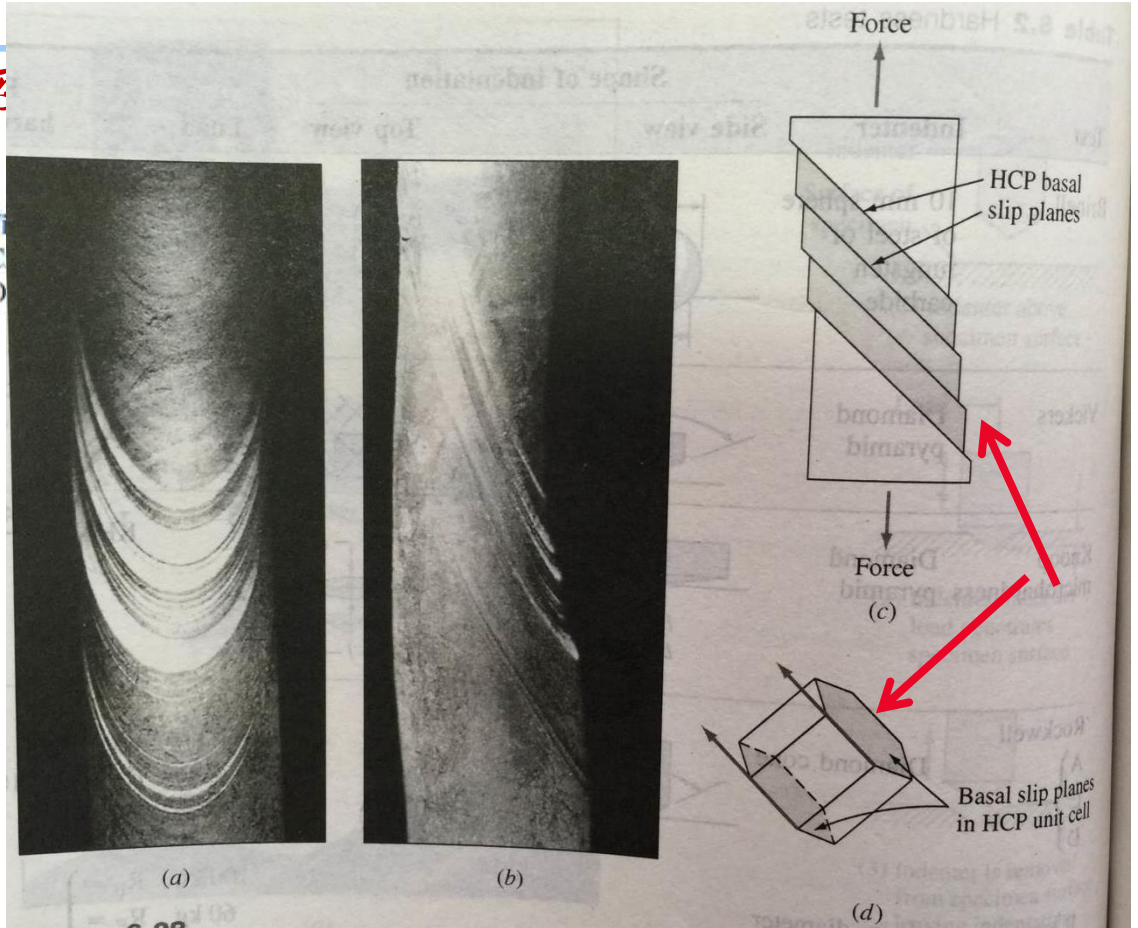
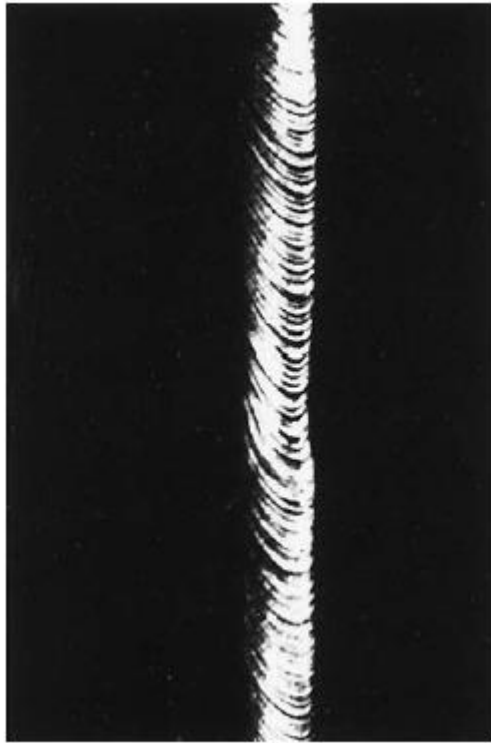


Figure 6.28

Plastically deformed zinc single crystal showing slipbands: (a) front view of real crystal, (b) side view of real crystal, (c) schematic side view indicating HCP basal slip planes in crystal, and (d) HCP unit cell indicating basal slip planes. (Zinc single-crystal photos courtesy of Prof. Earl Parker of the University of California at Berkeley.)

密排六方晶体只有一个滑移面，沿滑移面滑移。图显示沿滑移面发生了滑移并在表面出现了凹凸。实物图上显示滑移带。

3.1 塑性变形

单晶体的塑性变 滑移变形的特点

Cu单晶等FCC结构，有多个滑移面因此表面显得均匀。

图 (b) 显示相互平行的滑移面发生滑移

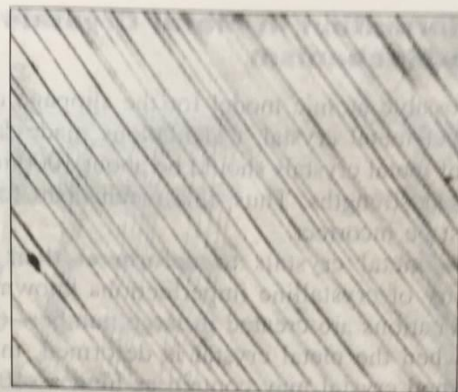


Figure 6.29
Slipband pattern on surface of copper single crystal after 0.9 percent deformation. (Magnification 100 \times .)
[After F. D. Rost, *Trans. AIME*, **200:1018** (1954).]

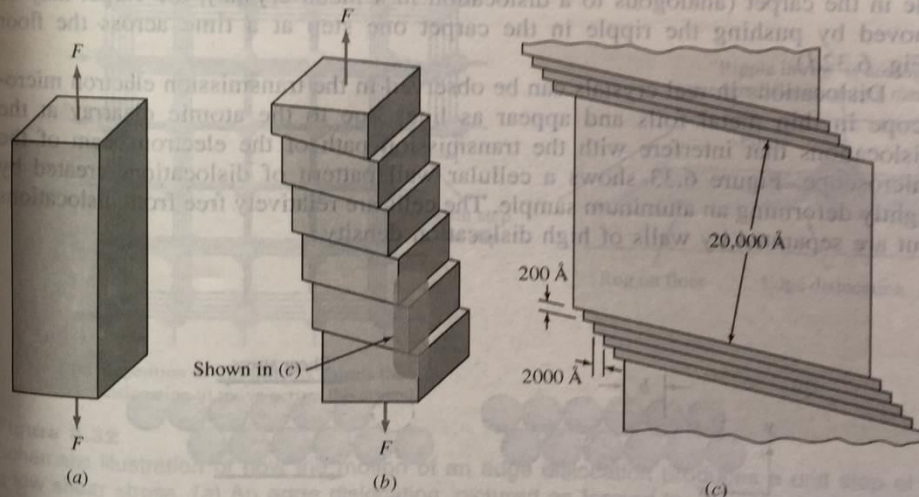


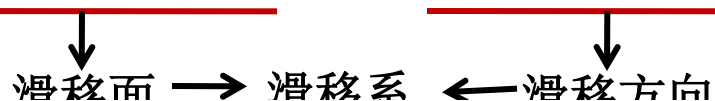
Figure 6.30
The formation of slipbands during plastic deformation. (a) A single crystal under a tensile force. (b) Slipbands appear when the applied stress exceeds the yield stress. Blocks of crystal slide past each other. (c) The shaded region of (b) has been magnified. Slip occurs on a large number of closely packed slip planes that are parallel. This region is called a *slipband* and appears as a line at lower magnification.
[After M. Eisenstadt, "Introduction to Mechanical Properties of Materials," Macmillan, 1971, p. 219.]

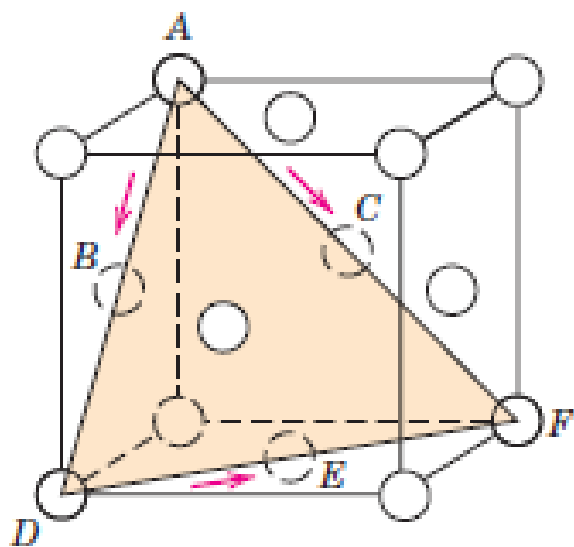
3.1 塑性变形

单晶体的塑性变形

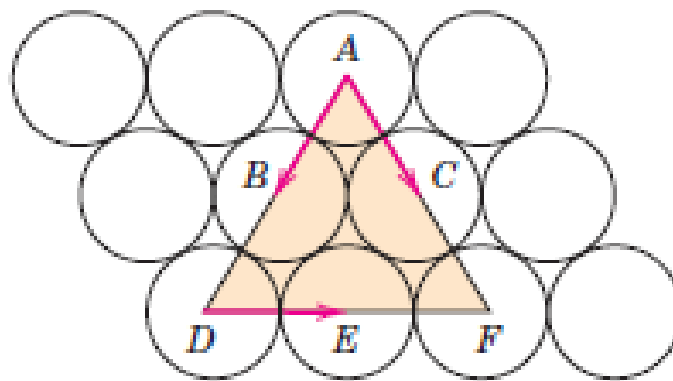
滑移变形的特点

- ② 滑移是晶体内部位错运动的结果
- ③ 滑移沿原子密度最大的晶面和原子密度最大的晶向发生





(a)



(b)

Figure 8.6 (a) A $\{111\}\langle 110\rangle$ slip system shown within an FCC unit cell. (b) The (111) plane from (a) and three $\langle 110\rangle$ slip directions (as indicated by arrows) within that plane comprise possible slip systems.

3.1 塑性变形

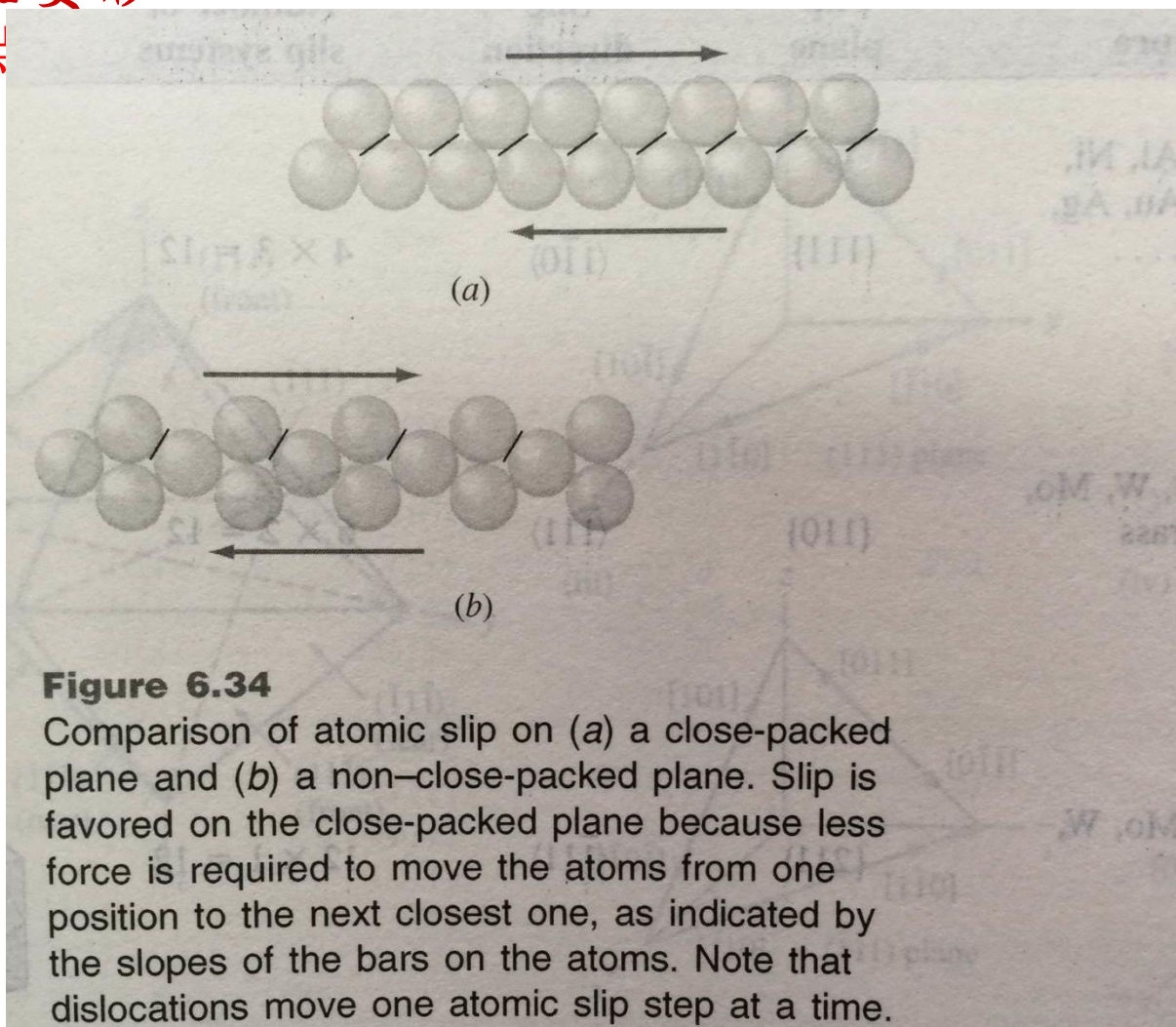
单晶体的塑性变形 滑移变形的特点

沿着滑移面移动需要剪切力最小，密排面与密排面间距离最大。

如图所示，**a**图原子移动的坡度小，而**b**图非原子密度最大面，原子移动坡度大，需要剪切力大。

密排方向最大的方向原子距离最近，移动距离最短。

当滑移面不利于滑动时
(应力作用) 非滑移面
也会滑移



3.1 塑性变形

单晶体的塑性变形

滑移变形的特点

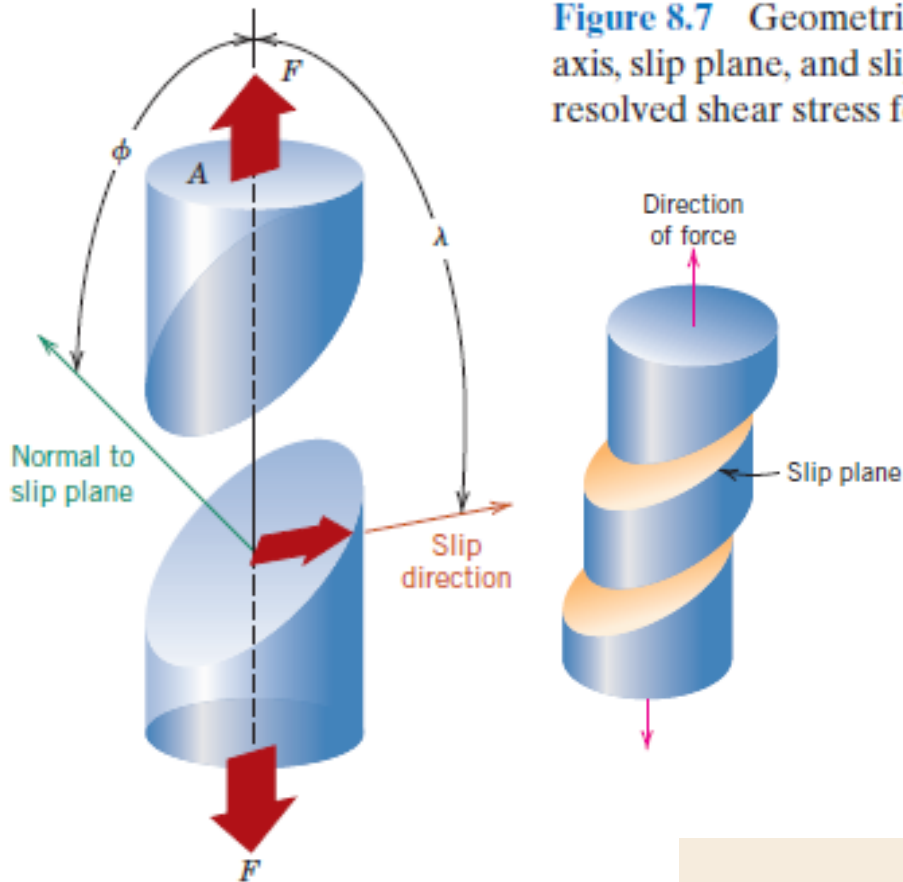


Figure 8.7 Geometrical relationships among the tensile axis, slip plane, and slip direction used in calculating the resolved shear stress for a single crystal.

$$\tau_R = \sigma \cos \phi \cos \lambda$$

3.1 塑性变形

多晶体的塑性变形

多晶体金属发生塑性变形的方式仍然是滑移或孪生，但各个晶粒位向不同，存在许多晶界，变形复杂。

①晶界和晶粒位向对多晶体塑性变形的影响

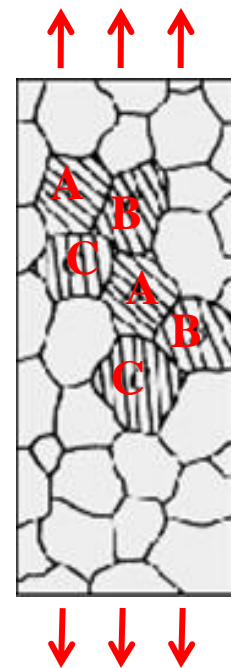
晶界的存在和每个晶粒间存在的位向差将导致强度和硬度提高。

②晶粒大小对多晶体金属力学性能的影响

多晶体金属的晶粒越细小，则强度和硬度越高，塑性和韧性也越好。

细晶强化：

通过细化多晶体金属的晶粒，以同时提高金属的强度和硬度、塑性和韧性的方法。



3.1 塑性变形

多晶体的塑性

多晶体塑性变形时位错沿着一个滑移面不能从一个晶粒，直线地，过度到另一个晶粒。在晶界处滑移线改变方向，每个晶粒内在有利的滑移面上形成滑移线，并和相邻晶粒有不同的方向。

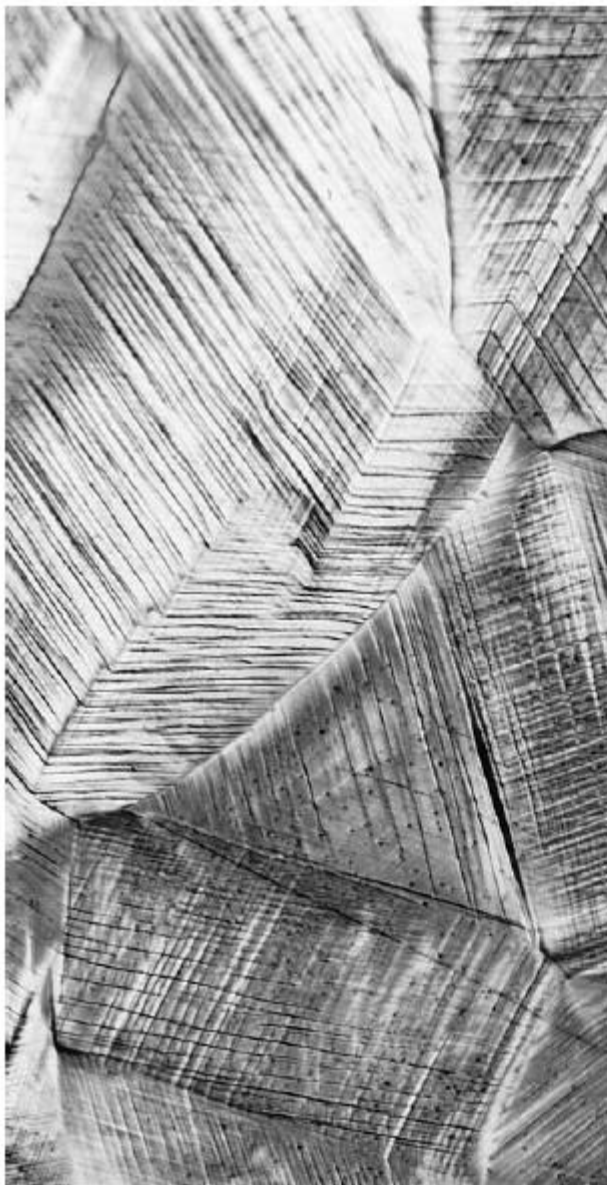


Figure 8.10 Slip lines on the surface of a polycrystalline specimen of copper that was polished and subsequently deformed. 173 \times . [Photomicrograph courtesy of C. Brady, National Bureau of Standards (now the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD).]

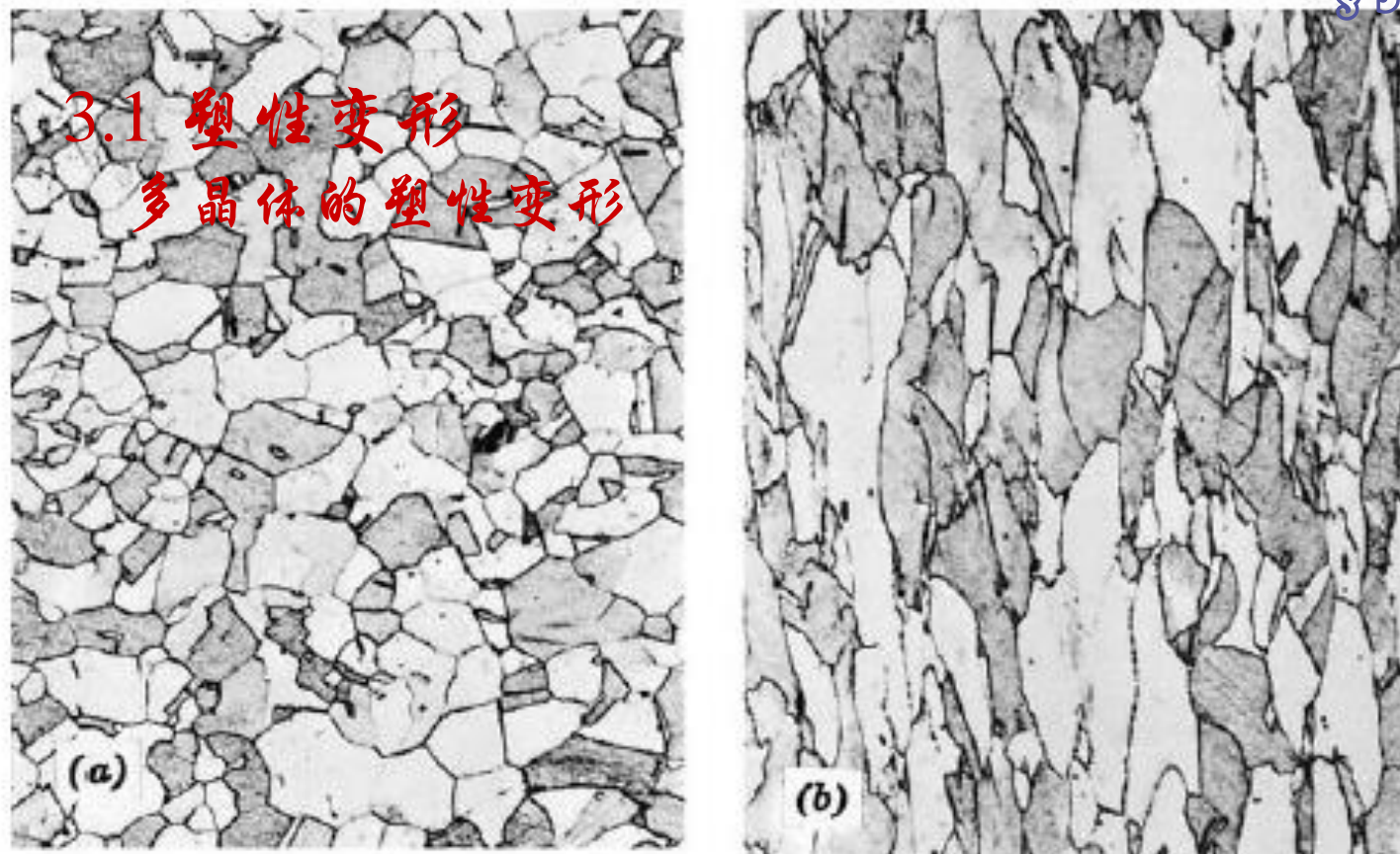


Figure 8.11 Alteration of the grain structure of a polycrystalline metal as a result of plastic deformation. (a) Before deformation the grains are equiaxed. (b) The deformation has produced elongated grains. 170 \times . (From W. G. Moffatt, G. W. Pearsall, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. I, *Structure*, p. 140. Copyright © 1964 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

多晶体塑性变形是晶界保持独立完整，不合并也不分开。每个单独晶粒受到周围晶粒的约束。上图显示变形前的等轴晶变为拉成晶粒

3.1 塑性变形

合金的塑性变形

①单相固溶体合金的塑性变形——固溶强化

固溶体中存在溶质原子，造成晶格畸变，从而对位错的运动有阻碍作用，使合金的强度和硬度升高。

②多相合金的塑性变形——弥散强化（第二相强化）

多相合金的组织中通常有两类不同的相，一是连续分布的基体相，二是以一定的形状和数量分布在基体相中的分散相（又称为第二相）。

分散相的性质、形状、大小、数量及分布对多相合金的塑性变形和力学性能有很大的影响。

a.第二相以网状分布在晶界上——降低强度和韧性（过共析钢中 $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ ）

b.第二相以片状分布在基体相中——提高强度和硬度，降低塑性和韧性(如共析钢平衡组织中的 Fe_3C)

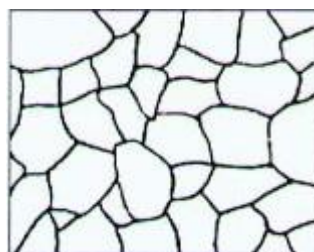
c.第二相以颗粒状分布在基体相中——显著提高强度和硬度，略降低塑性和韧性(粒状珠光体中 Fe_3C)

弥散强化（*Dispersion strengthened*）：第二相以细小的颗粒形状，均匀弥散地分布在基体相中，显著提高合金强度和硬度。

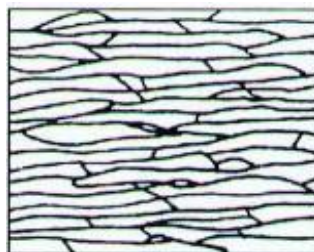
3.1 塑性变形

塑性变形对金属组织和性能的影响

① 塑性变形（冷加工）对金属组织结构的影响

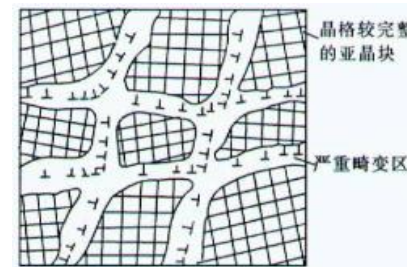


变形前



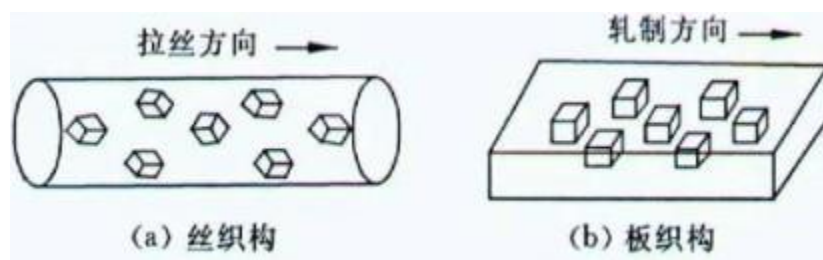
变形后

a. 晶粒变形，形成纤维组织



亚结构

b. 亚结构形成，细化晶粒



形变织构示意图

c. 形成变形织构

3.1 塑性变形

塑性变形对金属组织和性能的影响

① 塑性变形（冷加工）对金属组织结构的影响

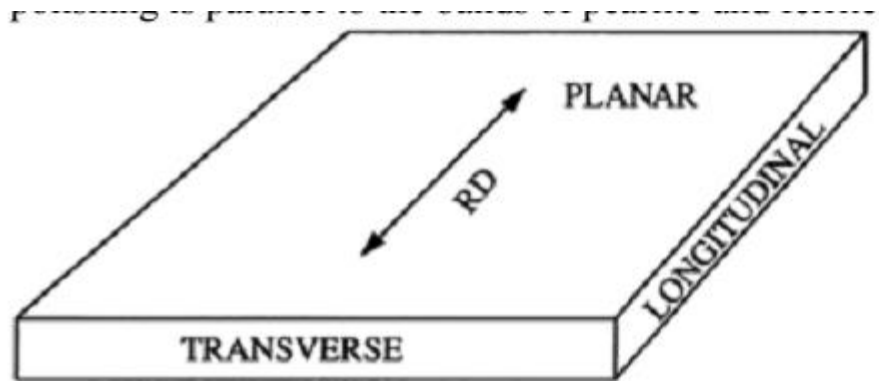


Fig. 12 Sketch showing the three planes of rolling. RD, rolling direction

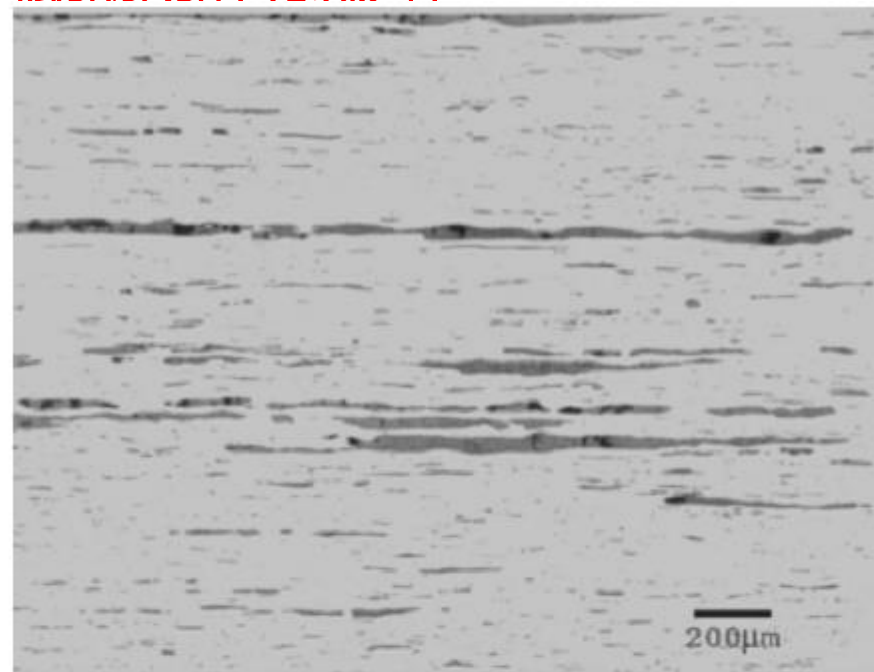
3.1 塑性变形

塑性变形对金属组织和性能的影响

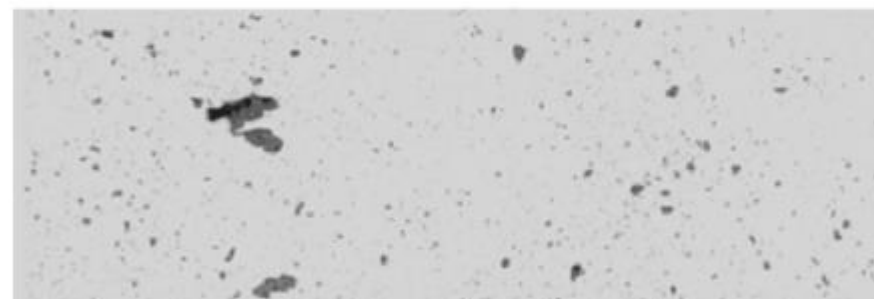
① 塑性变形（冷加工）对金属组织结构的影响



(a)



(a)



3.1 塑性变形

塑性变形对金属组织和性能的影响

② 塑性变形对金属性能的影响

加工硬化 (*work hardening*)

随着变形量的增加，金属强度和硬度升高，塑性和韧性下降的现象。

产生各向异性

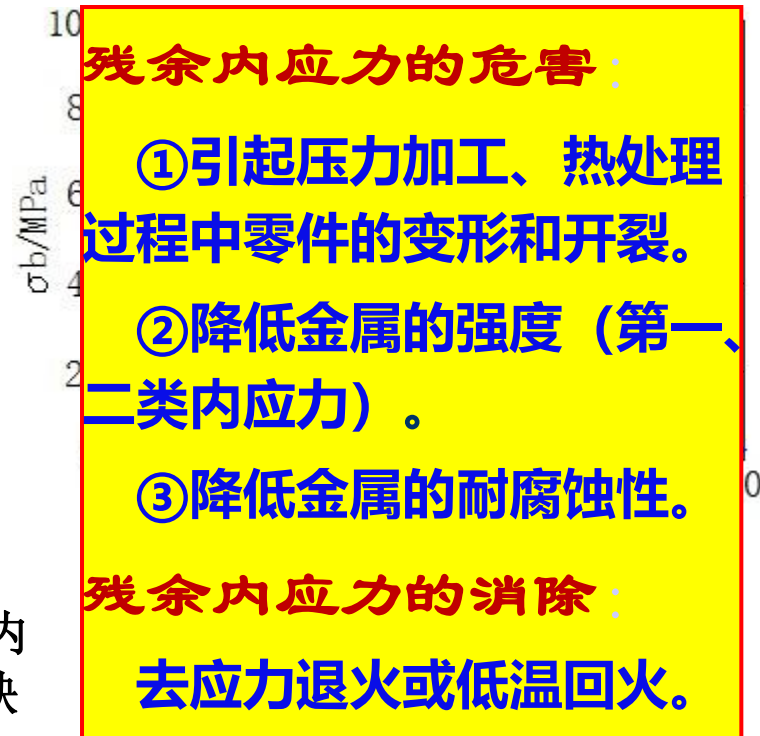
由于纤维组织和变形织构的形成，使金属的性能产生各向异性。

金属的物理、化学性能变化

塑性变形可影响金属的物理、化学性能。如使电阻增大，耐腐蚀性降低。

产生残余内应力

金属在发生塑性变形时，金属内部变形不均匀，位错、空位等晶体缺陷增多，金属内部会产生残余内应力。



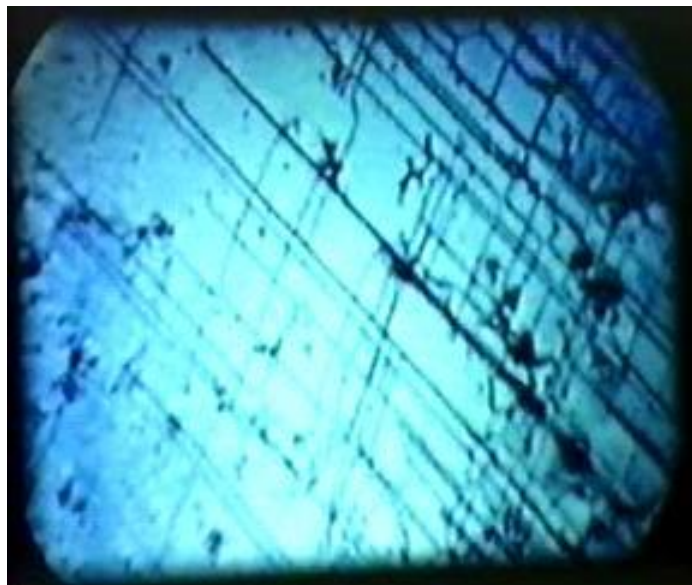
3.1 塑性变形

塑性变形对金属组织和性能的影响

产生加工硬化的原因:

塑性变形时, 位错密度增加, 位错间的交互作用增强, 相互缠结, 位错运动阻力增大, 塑性变形抗力提高。

同时晶粒破碎细化, 强度提高。

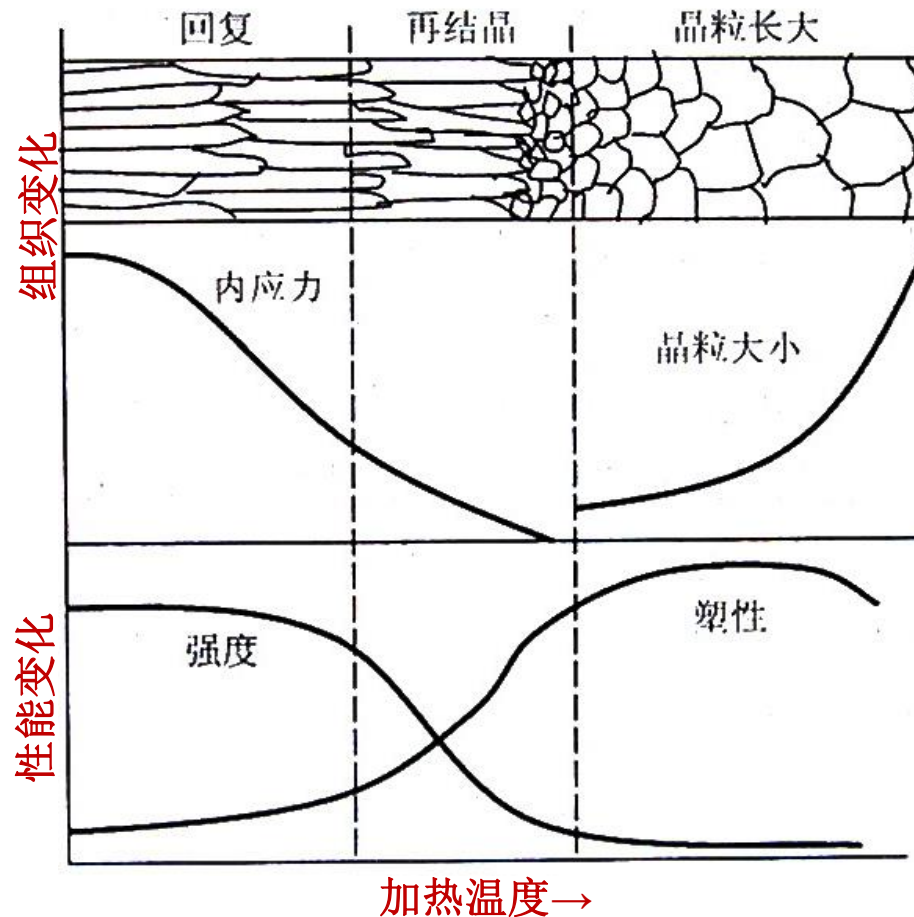


加工硬化



3.2 金属的再结晶

变形金属在加热过程中组织和性能的变化：回
复+再结晶+晶粒长大



冷变形金属在不同加热温度时组织和性能的变化

3.2 金属的再结晶

回复

冷变形金属在较低温度加热时，在光学显微组织发生改变前所产生的某些亚结构和性能的变化过程称为回复。

①组织、结构方面

a.显微组织没有明显变化。

b.亚结构发生一定的变化，表现为晶体缺陷数量有所减少。

②性能方面

a.力学性能没有明显变化(强度和硬度略有下降，塑性和韧性略有升高)。

b.内应力和电阻率明显降低。

③工业应用——去应力退火

将已经加工硬化的金属在较低的温度下加热，使其内应力基本消除，同时保持加工硬化的工艺方法。

产生回复的温度： $T_{\text{回复}} = (0.25 \sim 0.3) T_{\text{熔点}}$

3.2 金属的再结晶

再结晶(*recrystallization*)

冷变形金属在加热到一定温度后，在已变形组织中重新产生无畸变的新晶粒，性能发生明显的变化，并恢复到完全软化状态的过程称为再结晶。

①再结晶过程及其对金属组织、性能的影响

组织、结构方面

- a.变形的晶粒完全恢复为等轴状晶粒。
- b.晶体缺陷数量明显减少。

性能方面

- a.强度和硬度显著下降，塑性和韧性显著升高。
- b.冷变形时的加工硬化现象完全消失。
- c.内应力也基本被消除。

工业应用——再结晶退火

将已经加工硬化的金属加热到再结晶温度以上，使其发生再结晶，以消除加工理化的工艺方法。

举例：冷拉钢丝时，每拉拔一次，中间均进行再结晶退火，消除加工硬化，以便于下一次拉拔。

3.2 金属的再结晶

再结晶(*recrystallization*)

冷变形金属在加热到一定温度后，在已变形组织中重新产生无畸变的新晶粒，性能发生明显的变化，并恢复到完全软化状态的过程称为再结晶。

②再结晶的驱动力

再结晶的驱动力来自冷变形所产生的储存能。

再结晶过程也是一个形核和长大的过程。在温度作用下，再结晶的核心（晶核）在变形造成的最大畸变处形成，随后进一步长大，最终全面替换畸变的晶粒，金属组织重新恢复成无畸变的等轴晶。

③再结晶温度 —— 冷变形金属发生再结晶的最低温度

再结晶不是一个恒温过程，没有恒定的转变温度。因此，再结晶温度的意义是开始发生再结晶的温度，即在畸变的晶粒中产生无畸变等轴晶粒的最低温度。

影响再结晶温度的因素：
a. 预先变形度 b. 金属的熔点
c. 杂质和合金元素 d. 加热速度和保温时间

$$T_{\text{再}} = (0.35 \sim 0.4) T_{\text{熔点}}$$

3.2 金属的再结晶

再结晶(*recrystallization*)

冷变形金属在加热到一定温度后，在已变形组织中重新产生无畸变的新晶粒，性能发生明显的变化，并恢复到完全软化状态的过程称为再结晶。

④影响再结晶后晶粒度的因素

加热温度 ► —— 加热温度越高、保温时间越长，晶粒越粗大

预先变形度 ►

变形量较小：不发生再结晶，晶粒保持原状、大小。

变形量达到**2—10%**：再结晶后的晶粒异常粗大。

2—10%的变形量称为临界变形度。

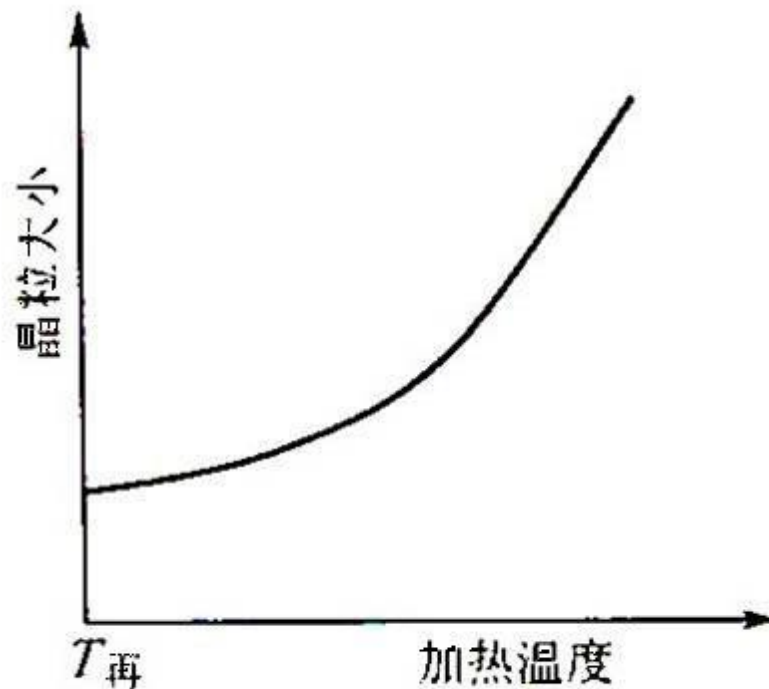
变形量超过临界变形度：随变形程度的增加，晶粒细小而均匀。

⑤晶粒长大

冷变形金属在再结晶结束后，继续升高温度或保温，晶粒就会不断长大，这一过程即称为晶粒长大，包括：正常长大和反常长大。



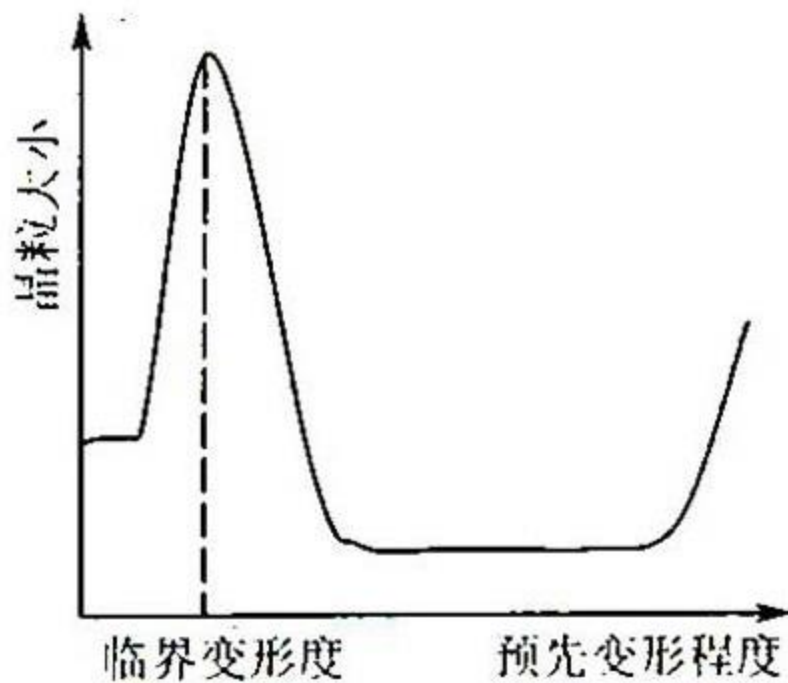
3.2 金属的再结晶



加热温度对晶粒度的影响



3.2 金属的再结晶



预先变形程度对晶粒度的影响



3.3 塑性变形和再结晶的工程应用

热加工、冷加工

热加工：指在再结晶温度以上的加工过程。

冷加工：指在再结晶温度以下的加工过程。

例：已知金属钨，铅的熔点分别为 3380°C 和 327°C ，试计算他们的最低再结晶温度，并分析钨在 900°C 加工，铅在室温加工各为何种加工？

$$T_{\text{再}} = (0.35 \sim 0.4) T_{\text{熔点}}$$

$$\begin{aligned} T_{\text{钨再}} &= (0.35 \sim 0.4) \times (3380 + 273) = 1278.5 \sim 1461.2\text{K} \\ &= 1005.5 \sim 1188^{\circ}\text{C} > 900^{\circ}\text{C} \quad \text{为冷加工} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{\text{铅再}} &= (0.35 \sim 0.4) \times (327 + 273) = 210 \sim 240\text{K} \\ &= -63 \sim -33^{\circ}\text{C} < \text{室温} \quad \text{为热加工} \end{aligned}$$

3.3 塑性变形和再结晶的工程应用

热加工、冷加工

热加工：指在再结晶温度以上的加工过程。

冷加工：指在再结晶温度以下的加工过程。

①金属的热加工及其对组织和性能的影响

- a. 热加工能使铸态金属中的气孔、疏松、微裂纹焊合，提高金属的致密度；减轻甚至消除树枝晶偏析和改善夹杂物、第二相分布等；明显提高金属的机械性能，特别是塑性和韧性。
- b. 热加工能打碎铸态金属中的粗大树枝晶和柱状晶，并通过再结晶获得等轴细晶粒。
- c. 形成纤维组织。

②金属的冷加工及其对组织和性能的影响——产生加工硬化现象

细晶强化、固溶强化、第二相强化（弥散）、加工硬化

3.3 塑性变形和再结晶的工程应用

喷丸强化

齿轮表面通过喷丸处理，表面发生加工硬化，同时产生较大的残余压应力，提高疲劳强度。



喷丸强化

3.3 塑性变形和再结晶的工程应用

再结晶退火

再结晶退火 消除塑性变形产生的加工硬化现象，恢复金属塑性变形的能力，以便继续进行形变加工。

如生产铁铬铝电阻丝时，在冷拔到一定的变形度后，要进行氢气保护再结晶退火，以便继续冷拔获得更细的丝材。

为了缩短处理时间，实际采用的再结晶退火温度比该金属的最低再结晶温度要高。

$$\text{再结晶退火温度} = T_{\text{再}} + (100\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 200\text{ }^{\circ}\text{C})$$

3.4 显微结构观察

光学显微镜

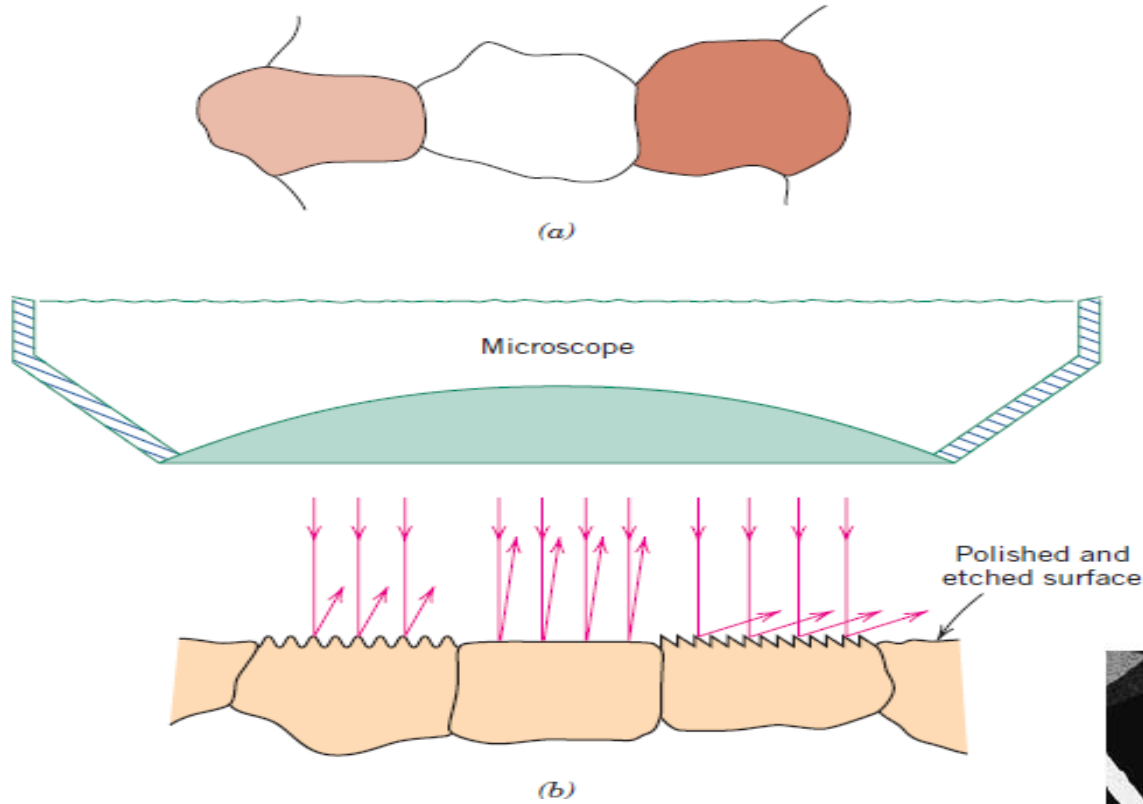


Figure 5.18 (a) Polished and etched grains as they might appear when viewed with an optical microscope. (b) Section taken through these grains showing how the etching characteristics and resulting surface texture vary from grain to grain because of differences in crystallographic orientation. (c) Photomicrograph of a polycrystalline brass specimen. 60 \times . (Photomicrograph courtesy of J. E. Burke)

单相多晶材料每个晶粒的侵蚀程度和晶粒取向有关。因此每个晶粒的腐蚀程度不同。图中显示三个不同位向的晶粒腐蚀程度不同，光反射不同。图a为显微镜可能观察到的不同颜色深度的晶粒形貌。



3.4 显微结构观察

光学显微镜

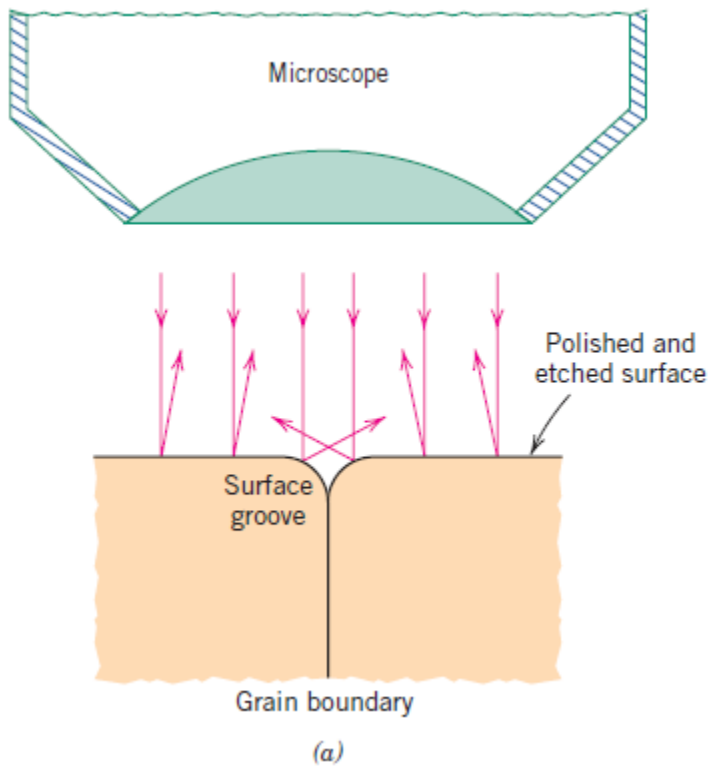
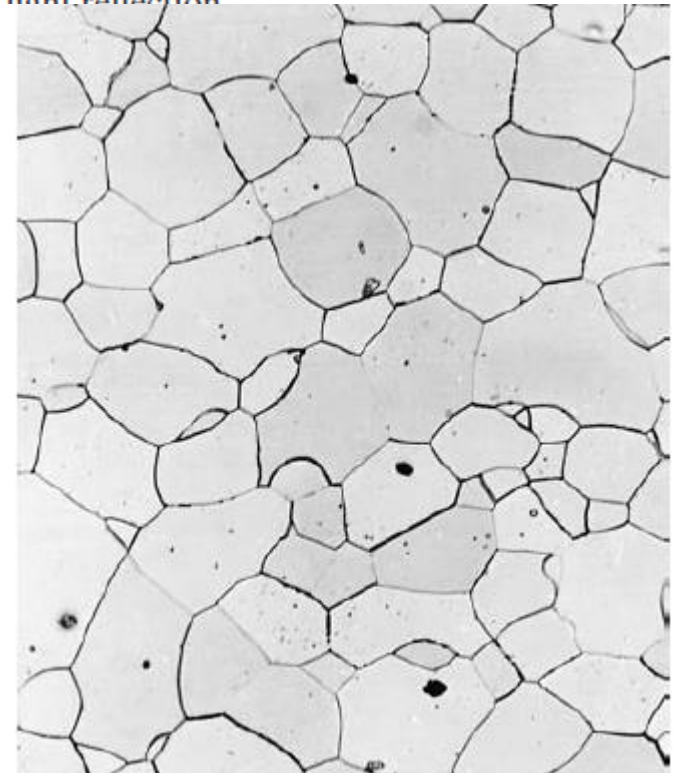


Figure 5.19 (a) Section of a grain boundary and its surface groove produced by etching; the light reflection characteristics are also shown. The surface of polycrystalline iron-chromium boundaries appears as a dark line. [Photomicrograph and C. Brady, Standards, Westinghouse Electric Company, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1980.]



(b)

晶界原子化学活性高，容易腐蚀，会出现沟槽。

3.4 显微组织观察

显微镜的历史

- 大约在400年前（1590年），由荷兰科学家杨森和后来的博物学家列文虎克发明和完善的显微镜，向人们揭示了一个陌生的微观世界，他们是开辟人类显微分析的始祖。



早期的显微镜

3.4 显微组织观察

显微镜的历史

- 因为早期的显微镜以玻璃镜片做透镜，使用可见光为光源，所以人们把它称为光学显微镜。现在，最好的光学显微镜可以达到1500倍的放大倍数。



现代的光学显微镜

3.4 显微组织观察

- 在光学显微镜的完善和发展过程中，人们发现：不管如何完善光学显微镜的透镜和结构，其放大倍数和分辨率总是被限定在1000多倍和几百纳米的水平，不可能再有所新的突破。
- 其中波长是光的特性之一。光学显微镜分辨率为：
$$S=1.22\lambda/(2n*\sin i)$$

n为折射率， $2i$ 为被观察物体对物镜的张角。其中 $2n*\sin i$ 称为数值孔径。可见为了增大其分辨率可以把物体放入具有较大折射率的油液中，或使用较短波长的紫光、软红外光照射。但都分辨率也只能达到200nm。数十年间人们花费了很多精力和智慧改进常规显微镜的分辨率，却没有产生革命性的进展。

3.4 显微组织观察

分辨率就是能够把两个点分辨开的最小距离。人眼睛的分辨率大约为0.1个毫米。

所以，要想看清比0.1个毫米还小的东西，就要借助于放大镜和显微镜。即利用显微镜把所要观察的物体至少放大到0.1个毫米以上，我们才能看清它。

- 在后来，人们终于发现：是显微镜所使用的光源限制了光学显微镜的放大倍数和分辨率的进一步发展。因为，可见光的波长在390纳米到760纳米之间，而显微镜的分辨率最多也只能是其所使用光源的半波长的大小，所以光学显微镜的理论极限分辨本领也就在200纳米左右。

3.4 显微组织观察

- 若为了达到接近纳米的分辨率，使用的光源必须是X光；然而制作能使X光聚焦的镜片并不容易。因此，电子束便成为取代可见光源的必然的选择；同时，以电或磁场效应设计的透镜也应运而生，造就了电子显微镜的时代。
- 例如：1940年代发展出来的扫描电子显微镜（SEM），将分辨率提高至约2纳米，而成为现代科技中一项重要技术。其主要原理与传统光学显微镜类似，只不过以电子取代了光波，玻璃镜片换成了电磁镜片。

电子显微镜的产生

- 研究发现：静电磁场可以使电子的运动方向发生改变，对称的静电磁场可以像玻璃聚焦光线那样把电子束汇聚成一点，这使得用电子束聚焦成像成为可能，这样就产生了电磁透镜。由于电磁透镜能把电子束象光一样地聚焦成像，所以使用电子束做为光源的显微镜就应运而生了。这就是电子显微镜。

实用的电子显微镜

- 经过不断的实验和摸索，在上个世纪三十年代，由德国科学家M·克诺尔与E·鲁斯卡在柏林工学院制造出了世界上第一台透射式电子显微镜。由于使用了电子束做为显微镜的光源，电子显微镜的分辨率大大超过了光学显微镜，达到了零点几个纳米的水平。

3.4 显微组织观察

普通的透射电子显微镜



电子显微镜的分类

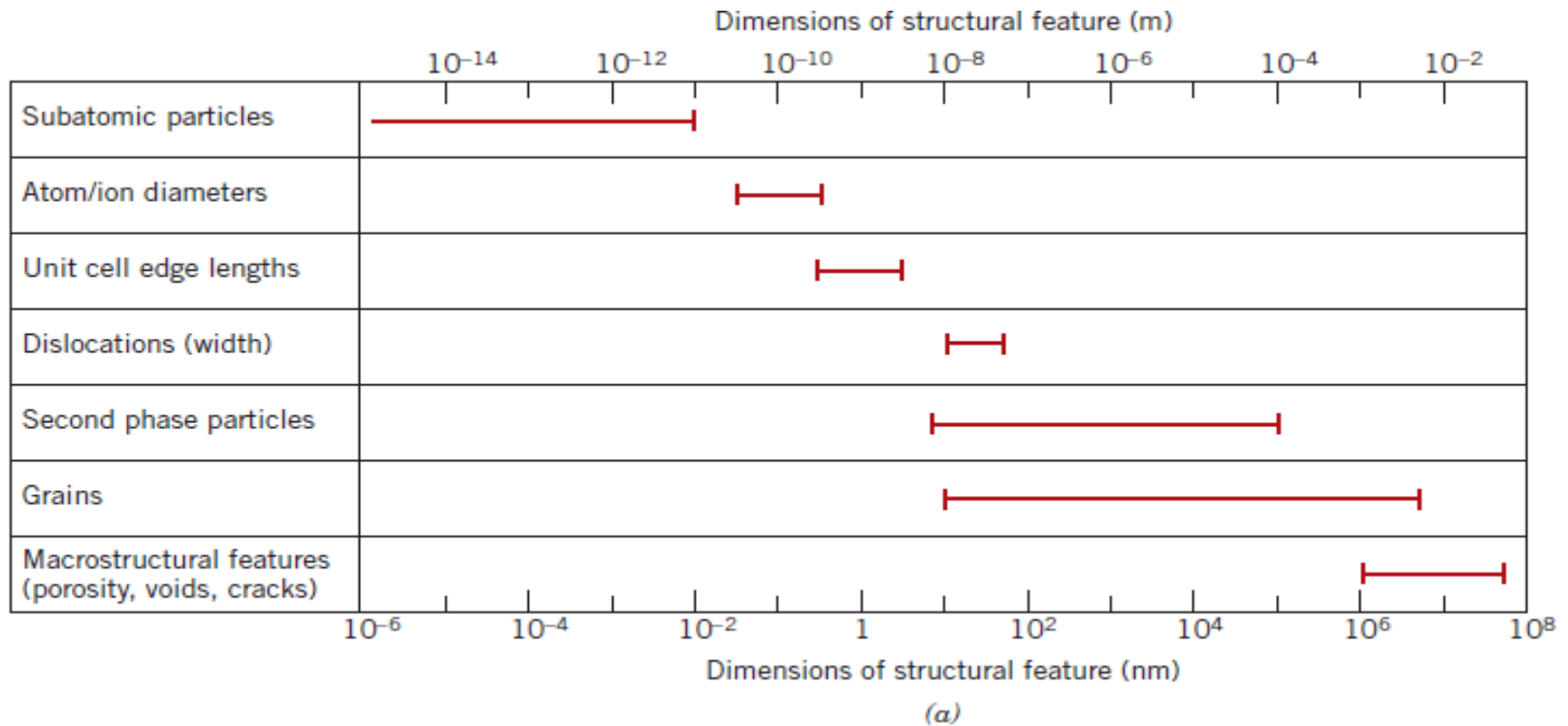
- 电子显微镜基本分为两种类型：
- 一种是：透射电子显微镜，
- 另一种是：扫描电子显微镜。
- 透射电镜是透射成像，图像是二维的，靠欠焦形成一定的图像反差。
- 扫描电镜是反射成像，图像是三维的，有很好的立体感，但分辨率低于透射电镜，目前指标分辨率可以达到3个纳米。

其它型式的显微镜

- 扫描隧道显微镜：利用隧道电流效应
- 原子力显微镜：利用原子力效应
- 激光力显微镜：利用激光作用力
- 磁力显微镜：利用磁作用力
- 以上各类显微镜都属于探针触摸效应方式的，而光学显微镜和电子显微镜则属于光的视觉效应方式。

3.4 显微组织观察

不同结构的尺度



3.4 显微组织观察

不同工具的分辨率

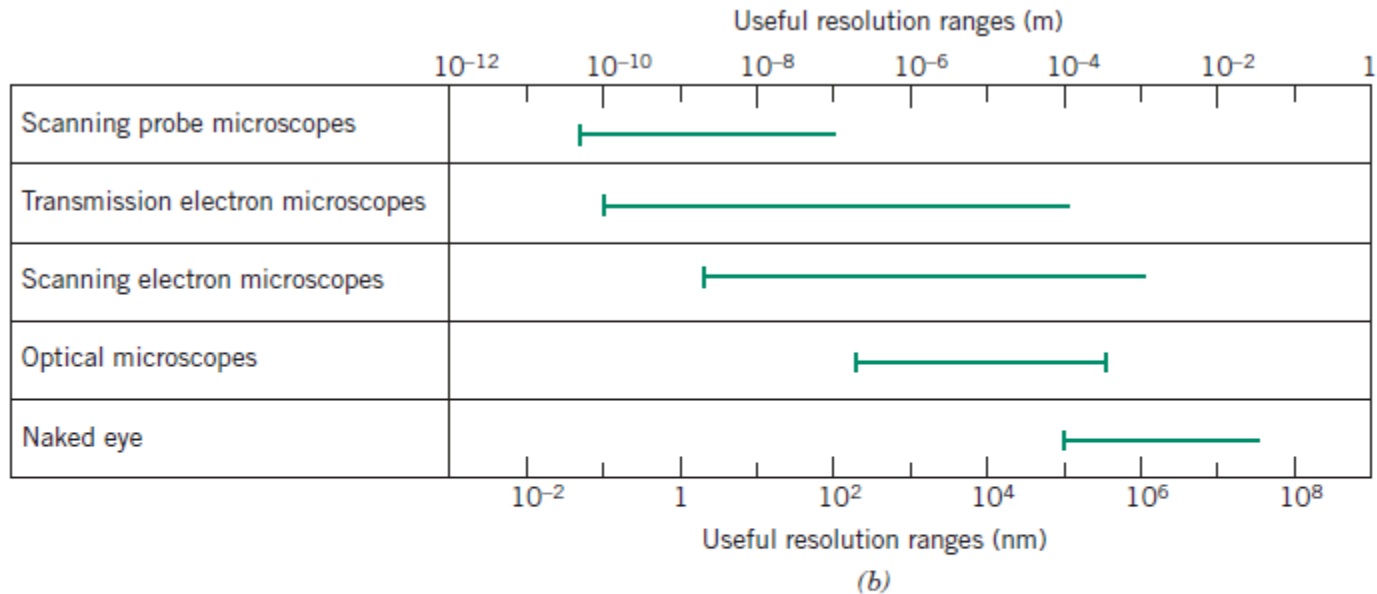


Figure 5.20 (a) Bar-chart showing size ranges for several structural features found in materials. (b) Bar-chart showing the useful resolution ranges for four microscopic techniques discussed in this chapter, in addition to the naked eye. (Courtesy of Prof. Sidnei Paciornik, DCMU PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brazil, and Prof. Carlos Pérez Bergmann, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil.)

金属的塑性加工

本节小结

金属的塑性变形

塑性变形机理：滑移、孪生

冷塑性变形对组织、性能影响：金属晶粒变形、位错密度增加、产生残余内应力，大的变形量可产生形变织构。产生加工硬化。

再结晶

再结晶：形成新的等轴晶，晶格形式不变。

再结晶对性能影响：消除加工硬化

再结晶温度： $T_{\text{再结晶}} = (0.35 \sim 0.4) T_{\text{熔点}}$