

*The first steps of humanity were thus marked by materials.....*

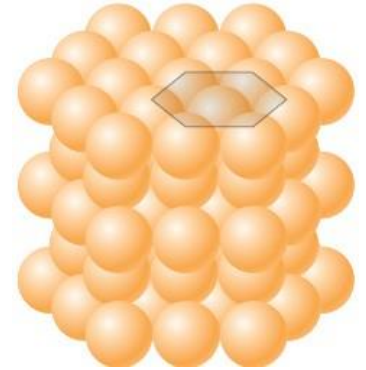
---

# 工程材料

*Engineering Materials*

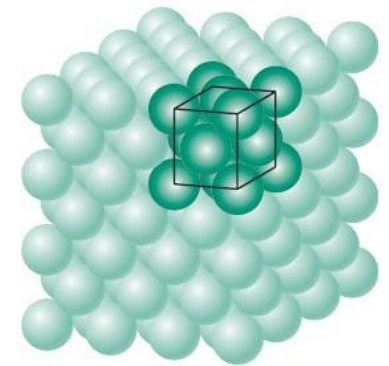
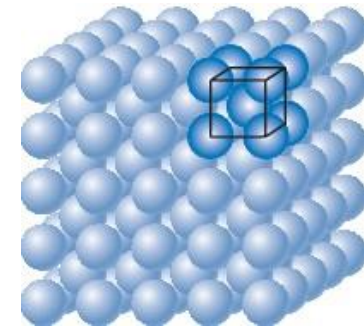
# 第一章 材料的结构与性能特点

1. 金属材料的结构与组织
2. 金属材料的性能特点
3. 高分子材料的结构与性能
4. 陶瓷材料的结构与性能特点



重点:

- (1) 基本概念
- (2) 三种常见金属的晶体结构
- (3) 实际金属中三大类晶体缺陷
- (5) 合金中的两类基本相(固溶体和金属化合物)
- (6) 金属材料性能的特点
- (7) 固溶强化



# 1. 金属材料的结构与组织

**晶体 (*crystal*)** : 原子(离子或分子)在三维空间有规则的周期性重复排列的物体。

**非晶体 (*non-crystal*)** : 原子(离子或分子)在空间无规则排列的物体。



图 晶体

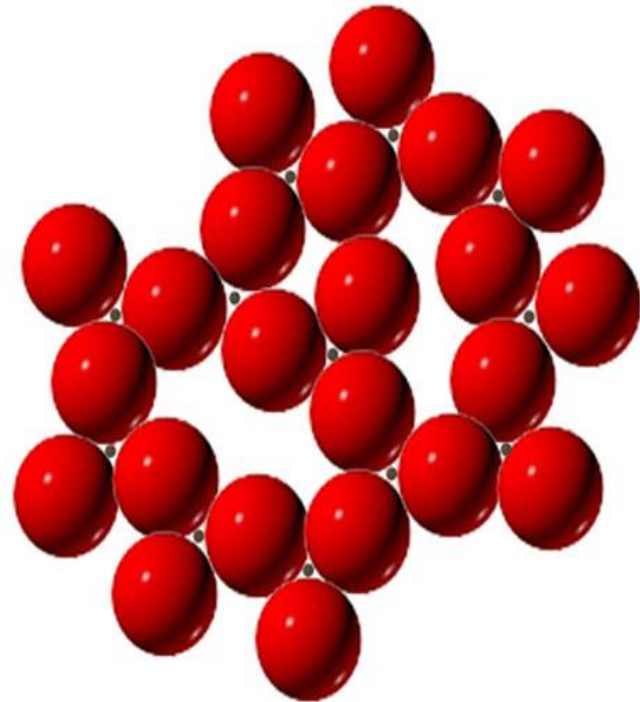


图 非晶体

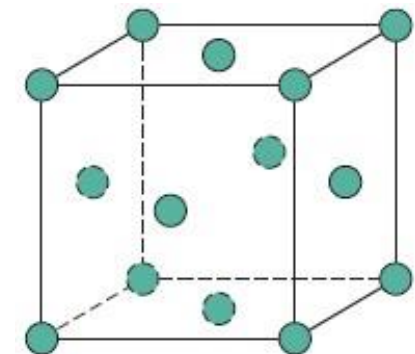
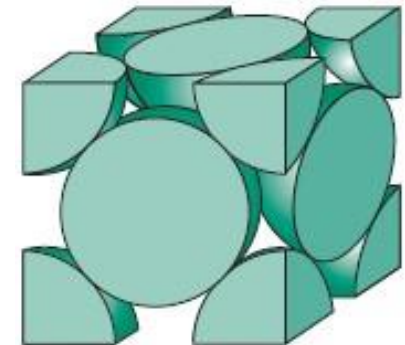
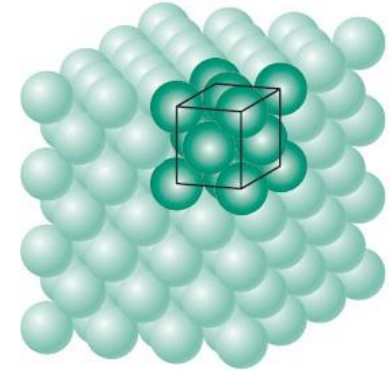
## 1.1 纯金属的晶体结构

### 基本概念

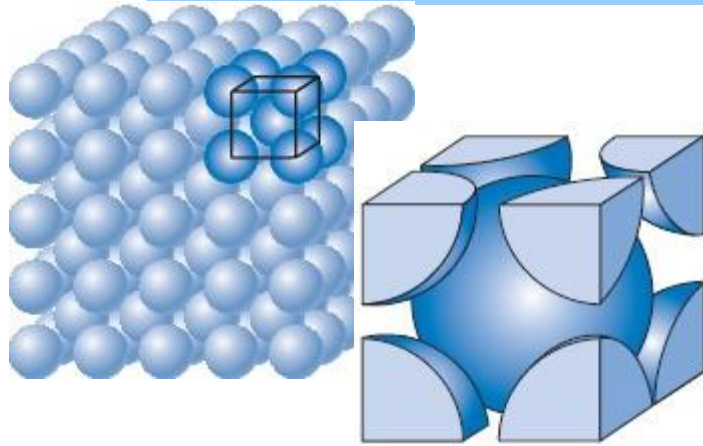
**晶体结构(*crystal structure*)**:  
晶体中原子(离子或分子) 规则排列的方式。

**晶胞 (*unit cell*)** :  
能反映晶格特征的最小组成单元。

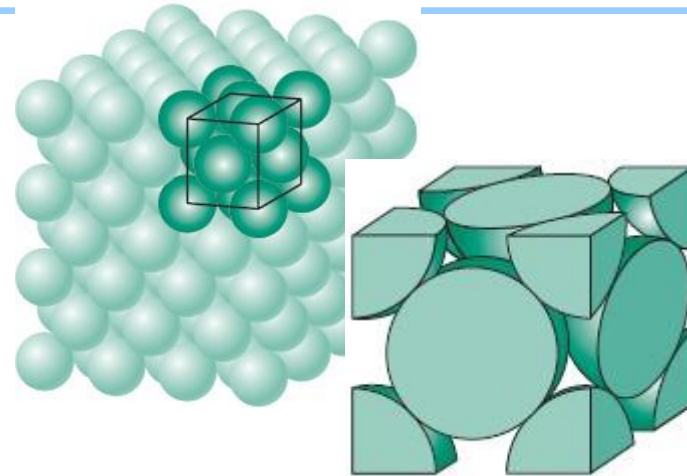
**晶格(*lattice*)**:  
通过金属原子的中心划出许多空间直线, 这些直线将形成空间格架。这种假想的格架称为晶格。



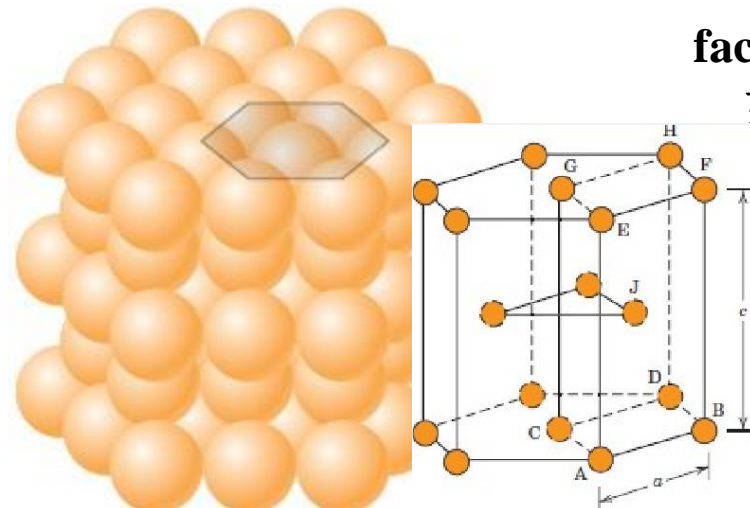
### 1.1.1 三种常见的金属晶体结构



体心立方晶格 body-centered cubic  
(BCC晶格)  
如:  $\alpha$ -Fe



面心立方晶格  
(FCC晶格)  
face-centered cubic  
如:  $\gamma$ -Fe、Cu



密排六方晶格 (HCP), hexagonal  
close-packed 如: Zn

## 1.1.1 三种常见的金属晶体结构

### 常见金属晶体结构特征

	原子数	原子半径	致密度	空隙半径	配位数
BCC	2	$\frac{\sqrt{3}}{4}a$	68%	$r_{四} = 0.29r_{原子}$ $r_{八} = 0.15r_{原子}$	8
FCC	4	$\frac{\sqrt{2}}{4}a$	74%	$r_{四} = 0.225r_{原子}$ $r_{八} = 0.414r_{原子}$	12
HCP	6	$\frac{1}{2}a$	74%	$r_{四} = 0.225r_{原子}$ $r_{八} = 0.414r_{原子}$	12

$\gamma$ -Fe (FCC) 转换 $\alpha$ -Fe(BCC)时体积将膨胀。空隙半径大则容纳其它小直径原子能力大， $\gamma$ -Fe 中最多可容纳质量分子数为2.11%， $\alpha$ -Fe为0.02%。

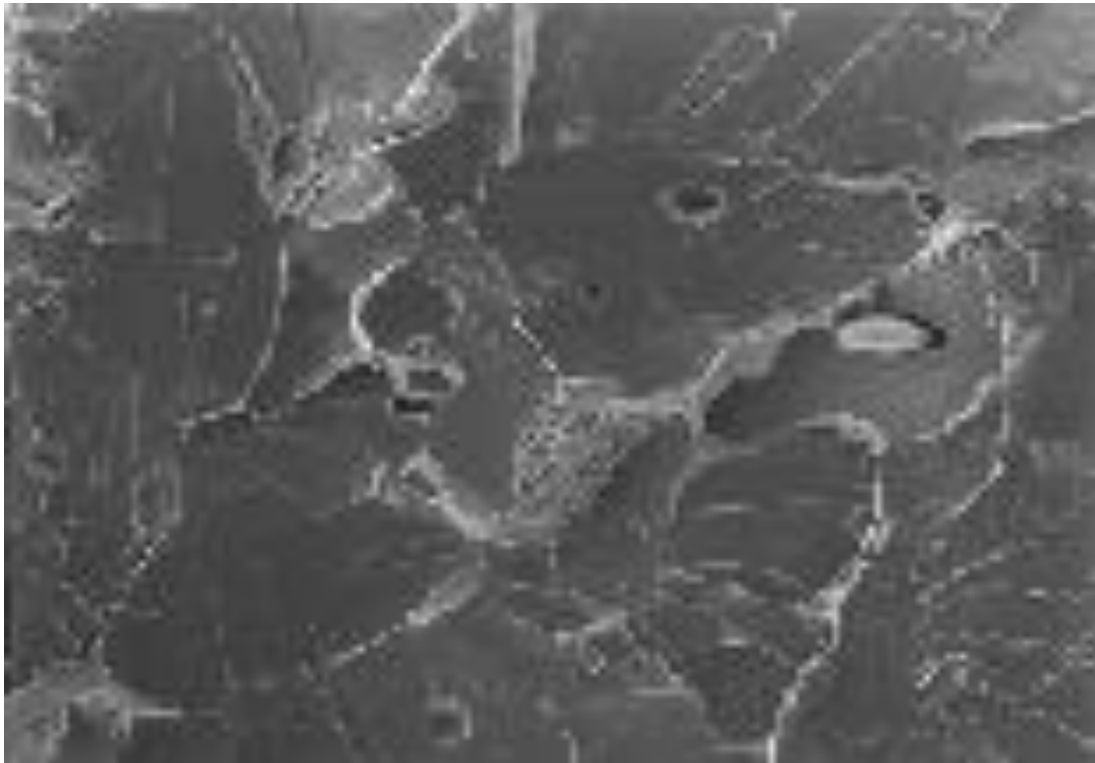
## 1.1.2 金属晶体中的晶向和晶面

### § 1.1 纯金属的晶体结构

#### ③ 线密度和面密度 (*linear and planar densities*)

A scanning electron micrograph of a Charpy impact fracture surface newly created at 0° C, showing cleavage planes containing ledges and protruding MnS particles.

The cleavage planes, (100) in ferrite, are quite apparent.



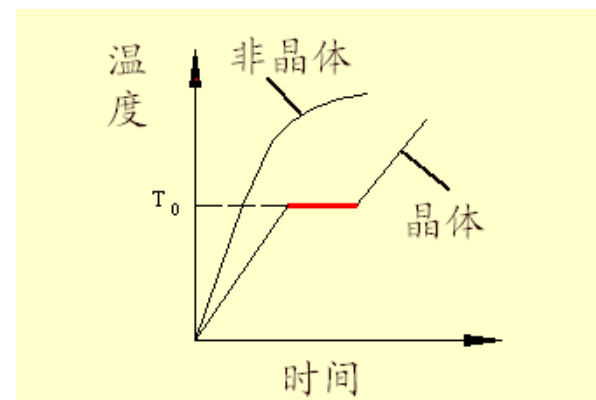
### 1.1.3 金属晶体的特性

#### ① 金属晶体具有确定的熔点

$T_0$ 为熔点

#### ② 金属晶体具有各向异性

**各向异性 (anisotropy)**：在晶体中，不同晶面和晶向上原子排列的方式和密度不同，它们之间的结合力的大小也不相同，因而金属晶体不同方向上的性能不同。这种性质叫做晶体的各向异性。



晶体、非晶体熔化曲线

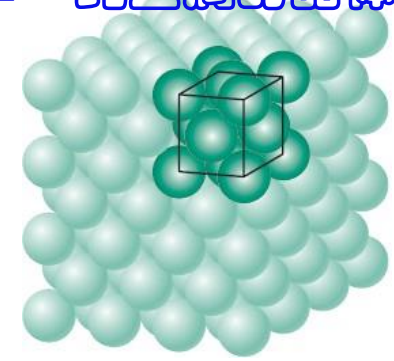
金属	弹性模量 (GPa)		
	[100]	[110]	[111]
铝	63.7	72.6	76.1
铜	66.7	130.3	191.1
铁	125.0	210.5	272.7
钨	384.6	384.6	384.6

## 1.1.4 实际金属中晶体缺陷 (*defects in metals*)

§ 1.1 纯金属的晶体结构

**理想晶体:** 晶体中原子严格地, 完全按规则排列, 在每个结点上都有原子。

**实际晶体:** 多晶体+缺陷



理想晶体

**材料中总是有缺陷的**

材料不是纯净的, 所谓“金无足赤”; 材料也不可能是理想完整的;  
产生的原因; 热力学、原子热运动。

**晶体缺陷定义:**

晶体材料中存在的一些原子排列不规则, 以致结构不完整的区域

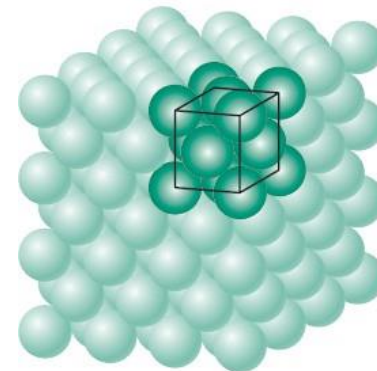
**缺陷的影响:**

对材料中原子扩散、相变、性能产生重要影响

## 1.1.4 实际金属中晶体缺陷 (*defects in metals*)

**理想晶体:** 晶体中原子严格地, 完全按规则排列, 在每个结点上都有原子。

**实际晶体:** 多晶体+缺陷



理想晶体

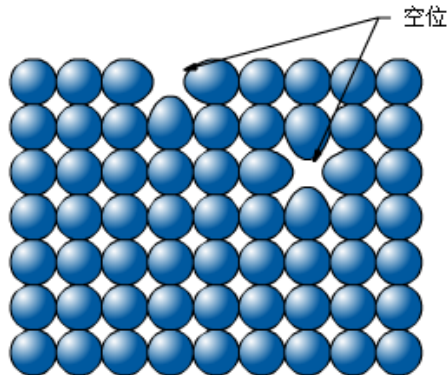
**缺陷可以分为三类:**

- ①点缺陷 (*point defects*)
- ②线缺陷 (*linear defects*)
- ③面缺陷 (*interfacial defects*)

## 1.1.4 实际金属中晶体缺陷 (*defects in metals*)

### (1) 点缺陷 (*point defects*)

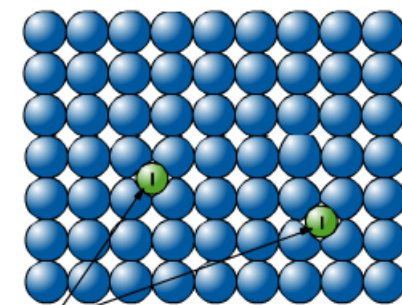
**点缺陷:**指在三维尺度上都很小的, 不超过几个原子直径的缺陷。



空位 (*vacancy*)

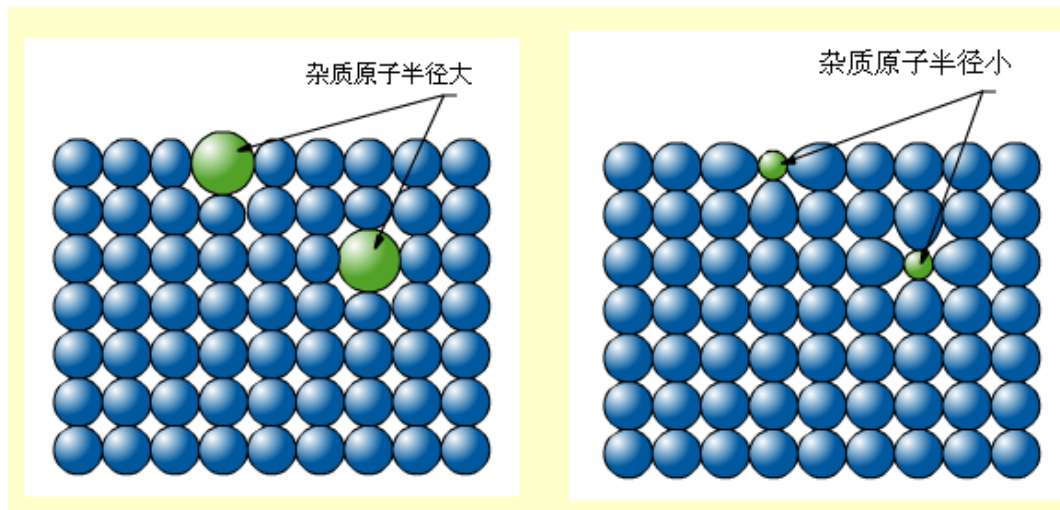
**空位:**晶格中, 某结点没有原子。是主要的点缺陷。造成晶格畸变。

**点缺陷造成晶格畸变!** 提高了材料的硬度和强度, 降低材料的塑性和韧性。



间隙原子 (*self-interstitial*)

**间隙原子:**晶格间隙之中的原子。造成大的晶格畸变。



异类原子 (*foreign atoms*)

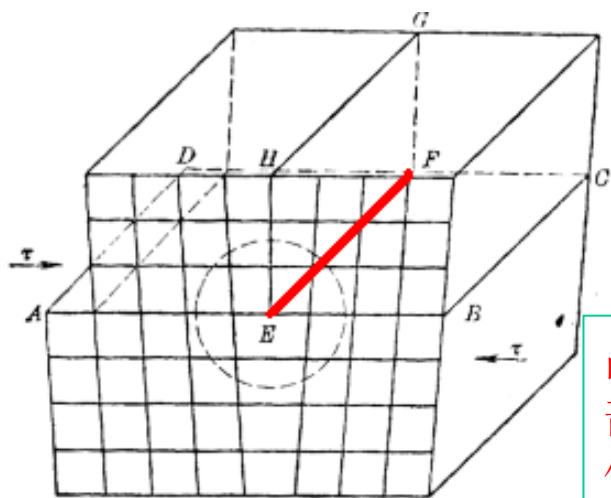
**异类原子:**不同于金属元素的其它原子

## 1.1.4 实际金属中晶体缺陷 (*defects in metals*)

### (2) 线缺陷 (*linear defects*)

**线缺陷:**指二维尺度很小而第三维尺度很大的缺陷, 也称位错(*dislocation*)

#### 刃型位错 (*edge dislocation*)



EF——位错线

在金属晶体中, 由于某种原因, 晶体的一部分相对于另一部分出现一个多余的半原子面。这个多余的半原子面犹如切入晶体的刀片, 刀片的刃口线即为位错线。这种线缺陷称为刃型位错。

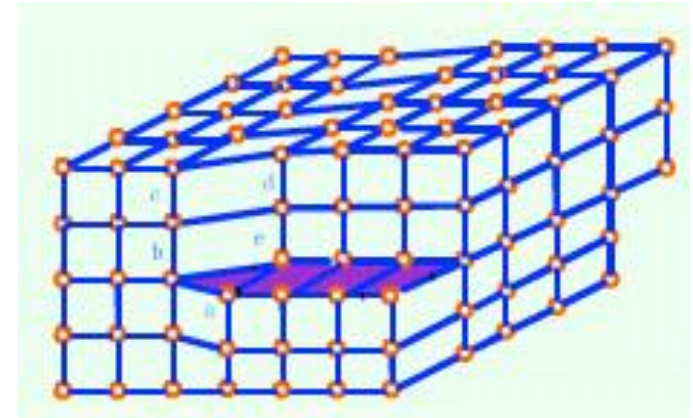
晶体材料中的一种内部微观缺陷, 即原子的局部不规则排列 (晶体学缺陷)。从几何角度看, 位错属于一种线缺陷, 可视为晶体中已滑移部分与未滑移部分的分界线。这一概念最早由意大利数学家和物理学家维托·伏尔特拉 (Vito Volterra) 于1905年提出。

## 1.1.4 实际金属中晶体缺陷 (*defects in metals*)

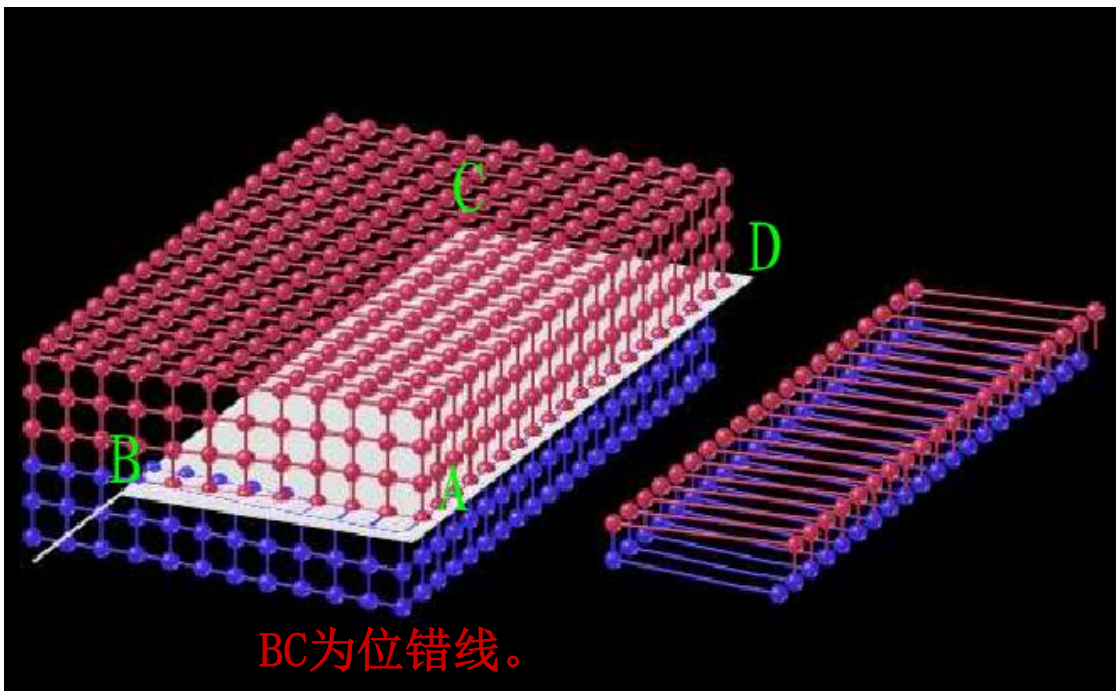
### (2) 线缺陷 (*linear defects*)

#### 螺型位错 (*screw dislocation*)

晶体右边的上部原子相对于下部的原子向后错动一个原子间距，即右边上部相对于下部晶面发生错动。若将错动区的原子用线连接起来，则具有螺旋型特征。这种线缺陷称为螺型位错。



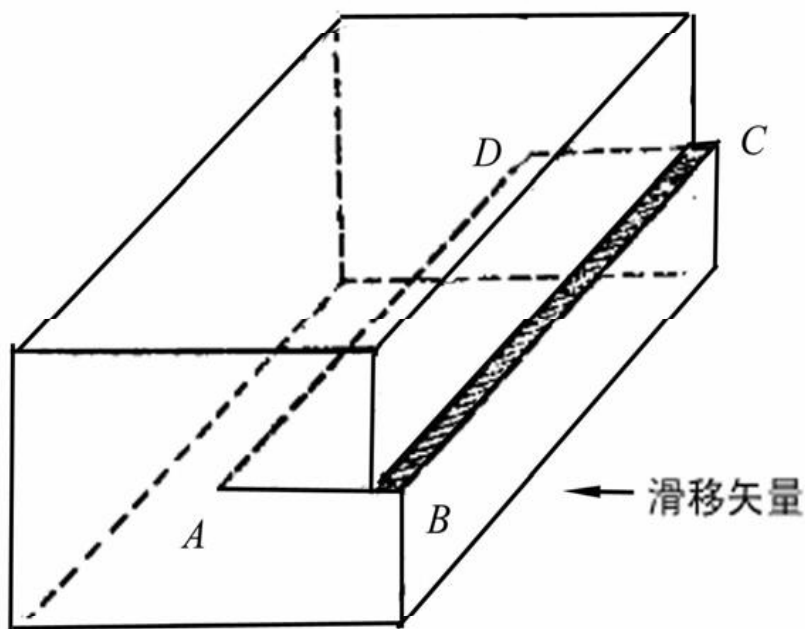
螺型位错



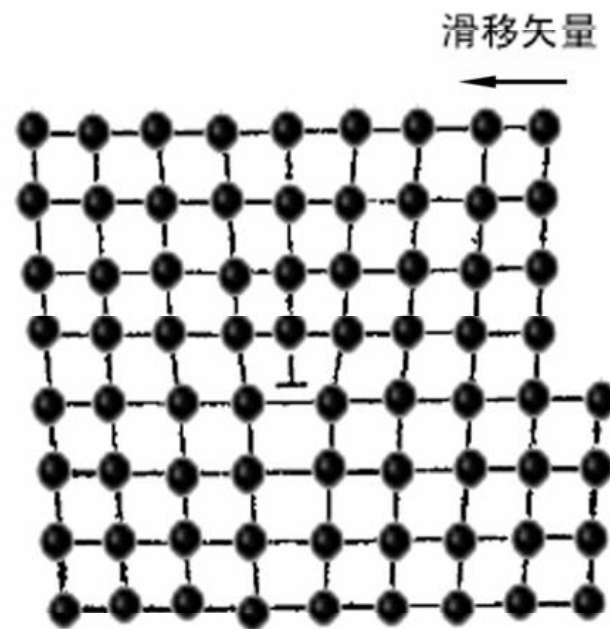
注意：线缺陷还包括混合位错，即刃型位错+螺型位错。

## 1.1.4 实际金属中晶体缺陷 (*defects in metals*)

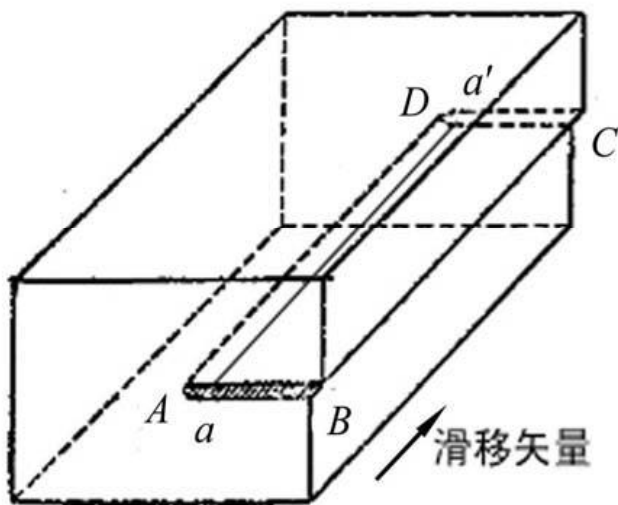
### (2) 线缺陷 (*linear defects*)



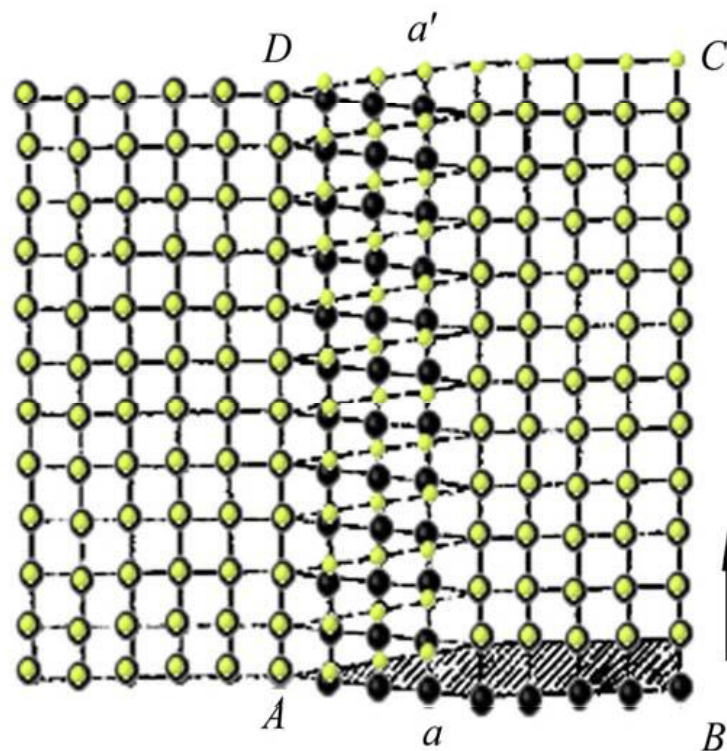
(a) 位错的形成



(b) 原子排列

1.1.4 实际金属中晶体缺陷 (*defects in metals*)(2) 线缺陷 (*linear defects*)

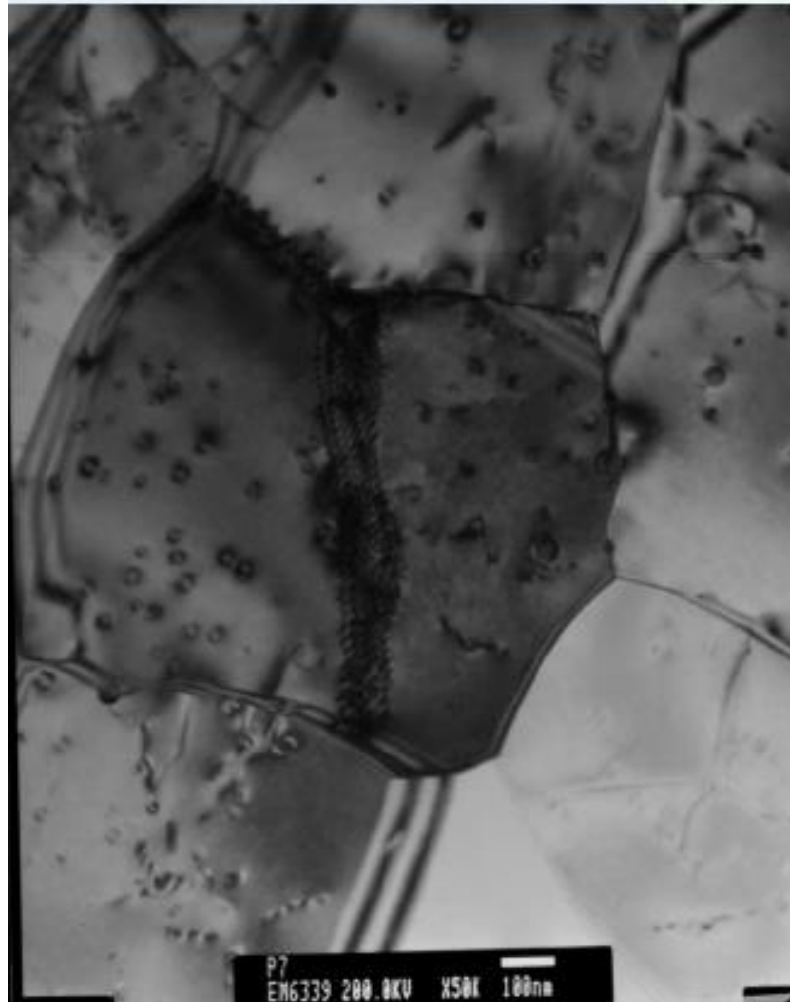
(a) 位错的形成



(b) 原子排列

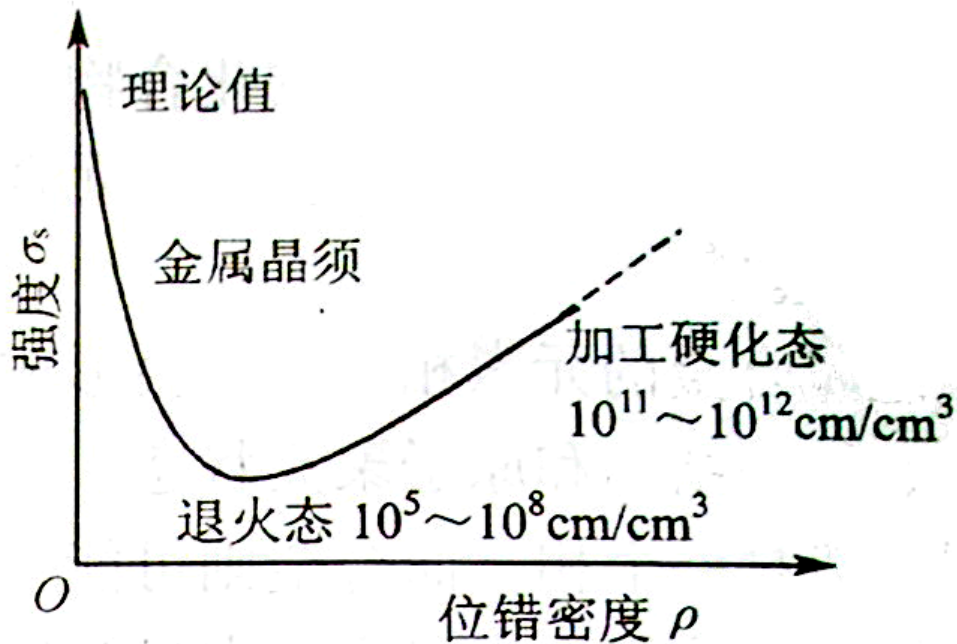
## 1.1.4 实际金属中晶体缺陷 (*defects in metals*)

### (2) 线缺陷 (*linear defects*)



## 1.1.4 实际金属中晶体缺陷 (*defects in metals*)

### (2) 线缺陷 (*linear defects*)



位错对晶体强度的影响

#### 位错对晶格规律性的影响

在位错线附近，原子的错排使晶格发生畸变。

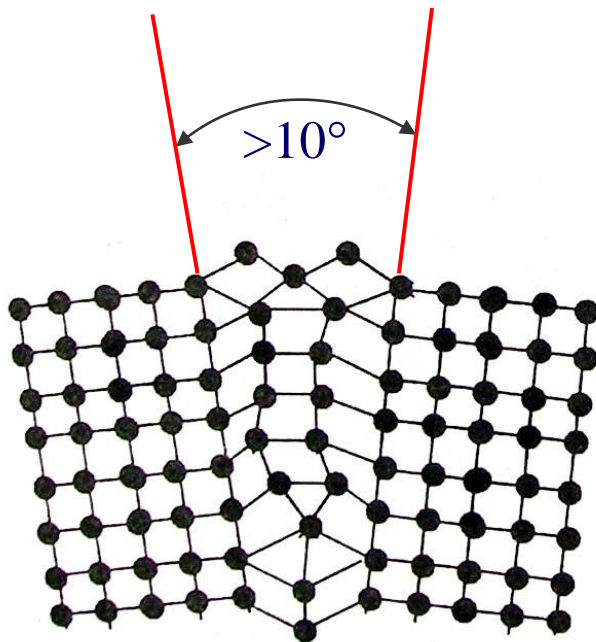
#### 位错对晶体性能的影响

位错的存在可降低晶体的强度。当位错大量产生后，又可提高强度，同时使晶体的塑性和韧性降低。

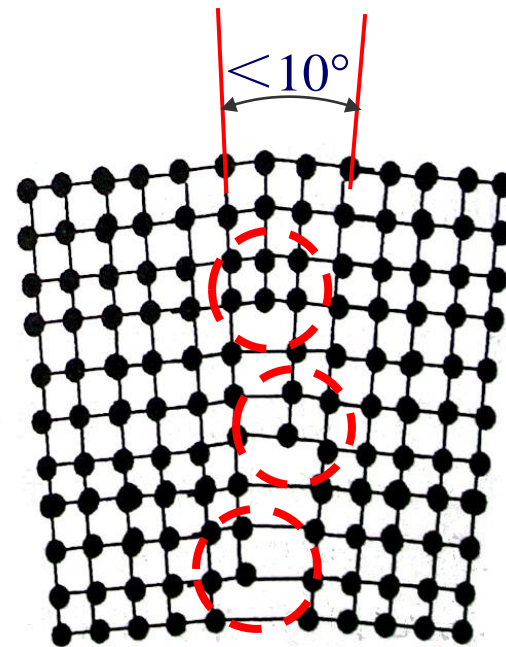
## 1.1.4 实际金属中晶体缺陷 (*defects in metals*)

### (3) 面缺陷 (*interfacial defects*)

**面缺陷:**指二维尺度很大而第三维尺度很小的缺陷。



晶界



亚晶界

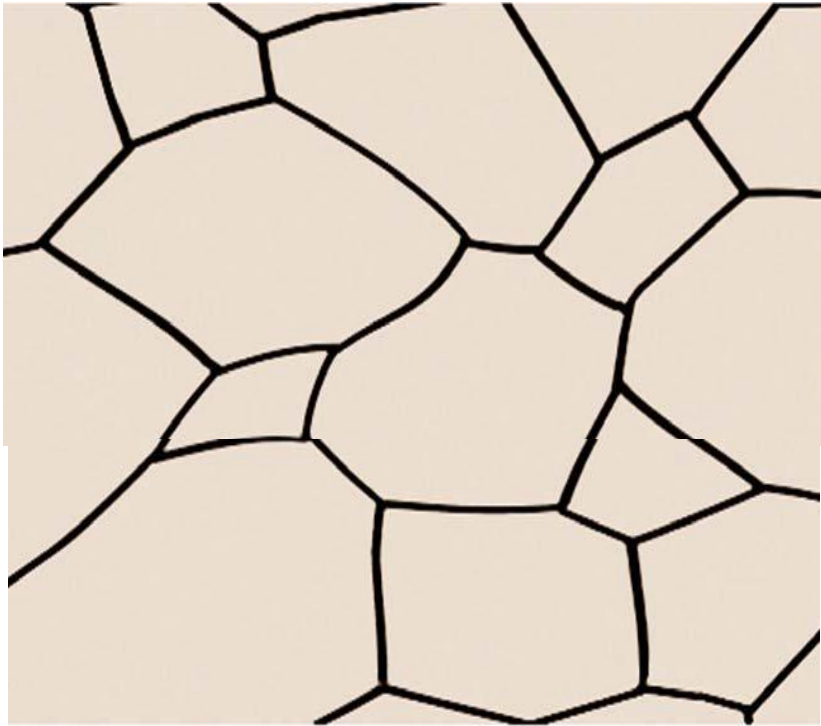
**晶界:**晶粒与晶粒之间的接触界面叫做晶界。

**亚晶界:**亚晶粒之间的边界面叫做亚晶界。

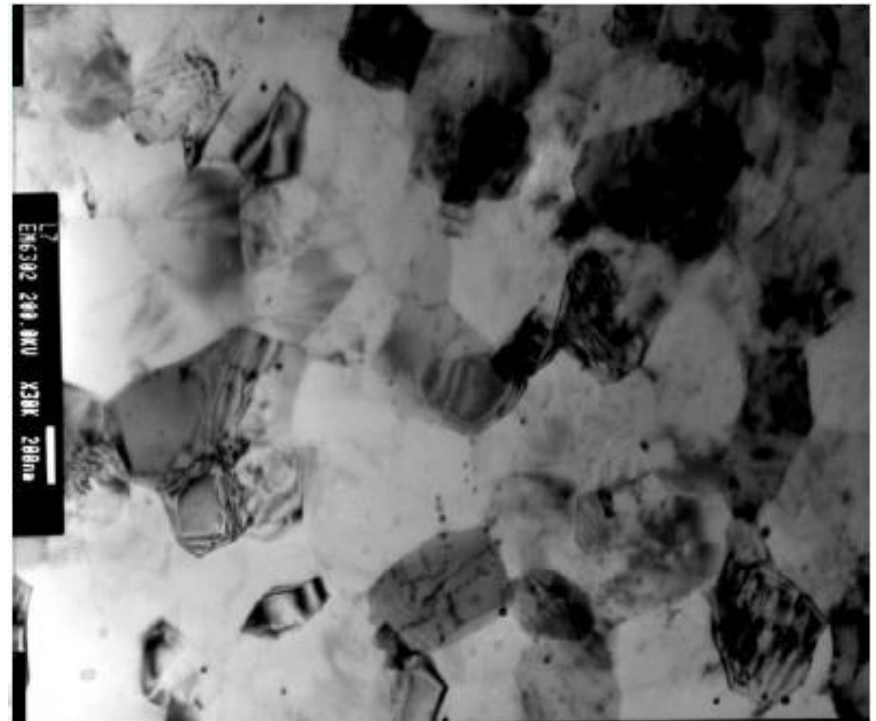
## 1.1.4 实际金属中晶体缺陷 (*defects in metals*)

### (3) 面缺陷 (*interfacial defects*)

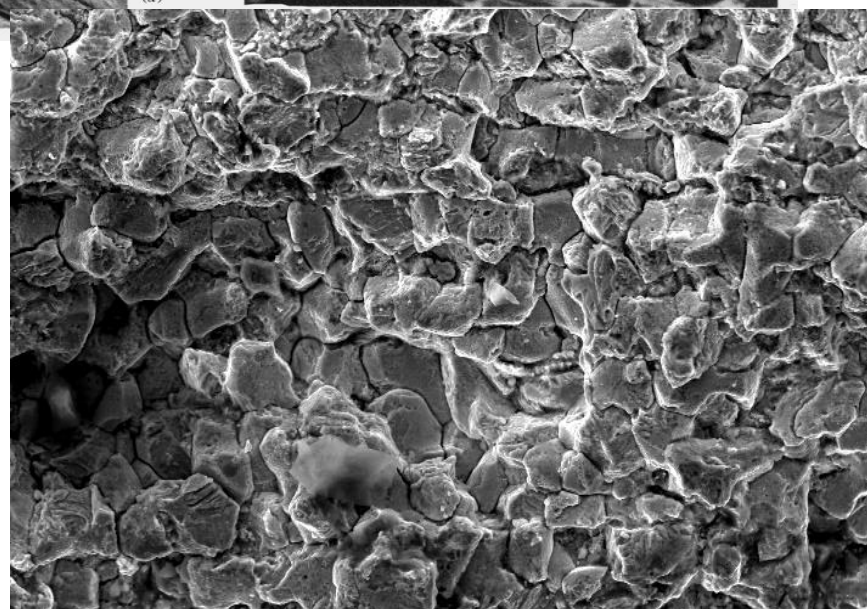
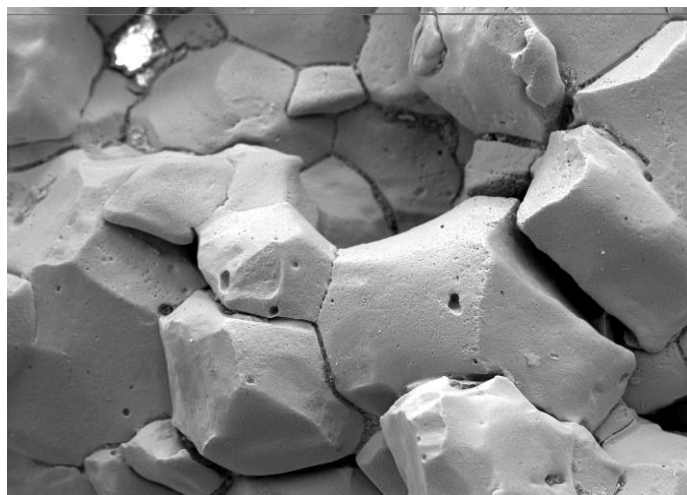
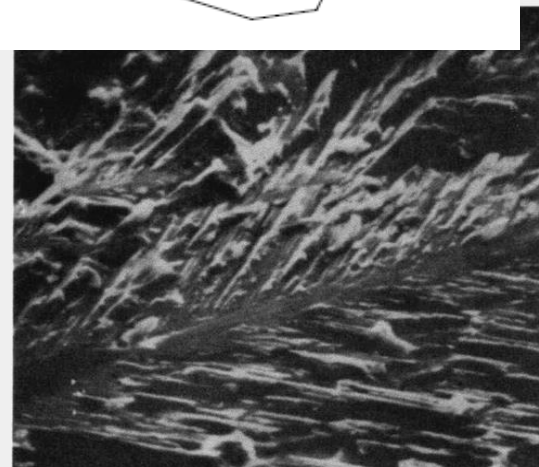
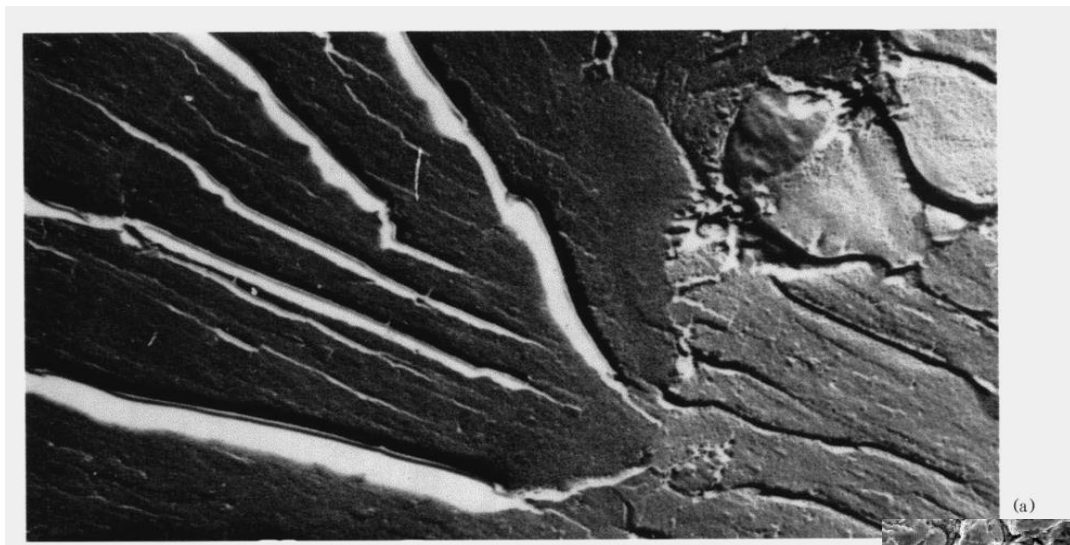
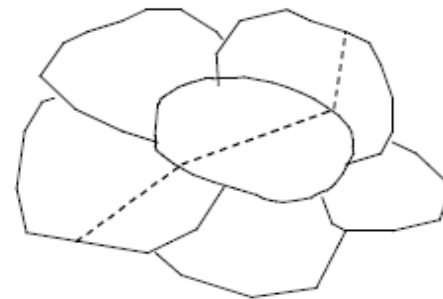
多晶粒材料模型



多晶粒材料透射电镜照片



1.1.4 实际金属中晶体缺陷 (



## 1.2 合金的晶体结构

### 重要概念

#### 合金 (*alloy*) :

一种元素同另一种或几种其他元素，通过熔化或其他方法结合在一起所形成的具有金属特性的物质。

#### 组元 (*component*) :

组成合金独立的最基本的单元。组元可以是金属、非金属或稳定化合物。

#### 二元合金 (*binary alloy*) :

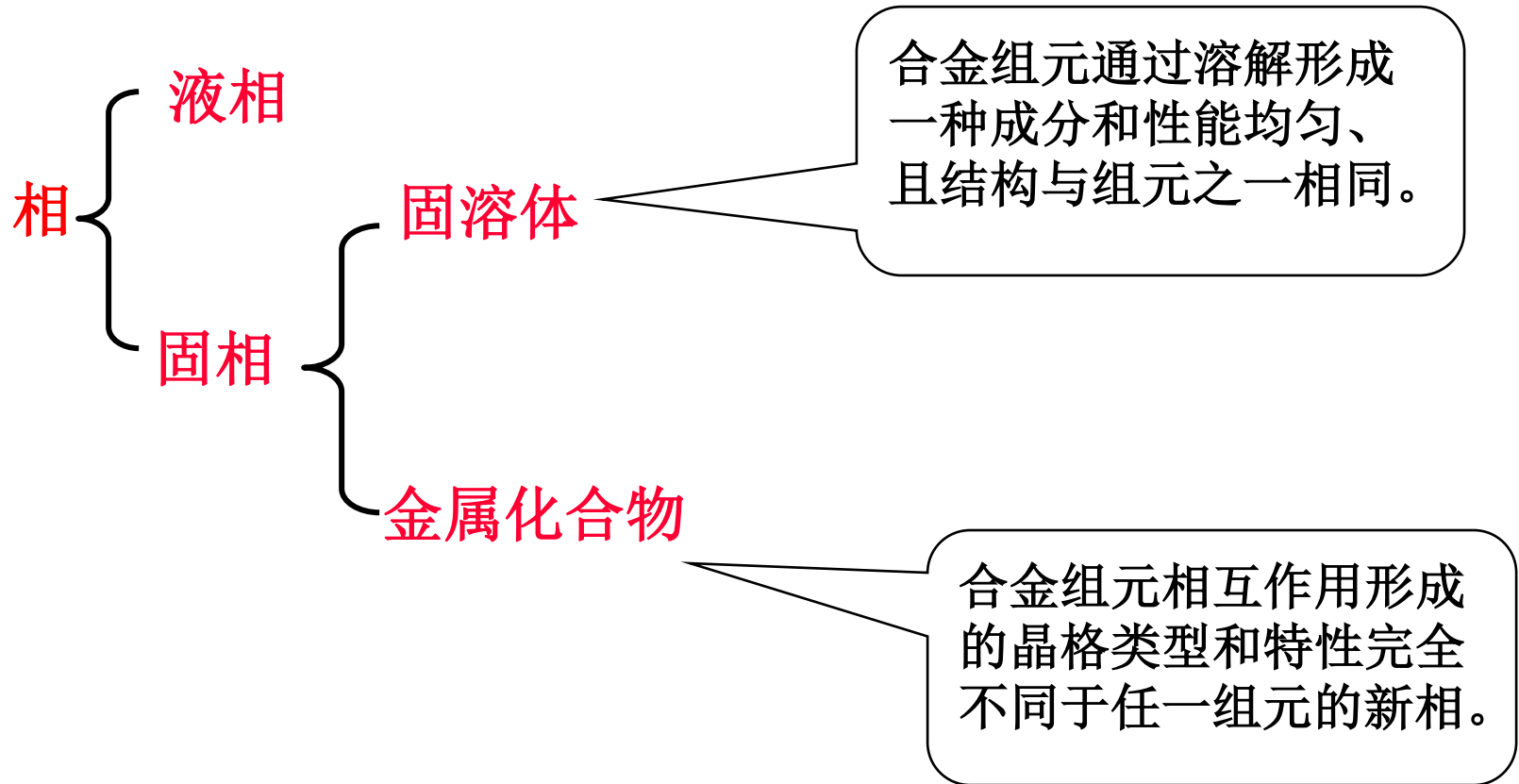
由两个组元组成的合金。

#### 相 (*phase*) :

合金中具有同一化学成分、同一结构和同一性能，并以界面互相分开的均匀的组成部分。

## 1.2 合金的晶体结构

### 重要概念



## 1.2 合金的晶体结构

### 固溶体

**固溶体 (solid solution)** : 组成合金的元素互相溶解, 形成一种与某一元素的晶体结构相同, 并包含有其它元素的合金固相。  
(金属中添加其它原子将导致固溶体的形成)。

**溶剂 (solvent)** : 合金中含量较多的组元

**溶质 (solute)** : 合金中含量较少的组元

**表示方法**:  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、A(B)

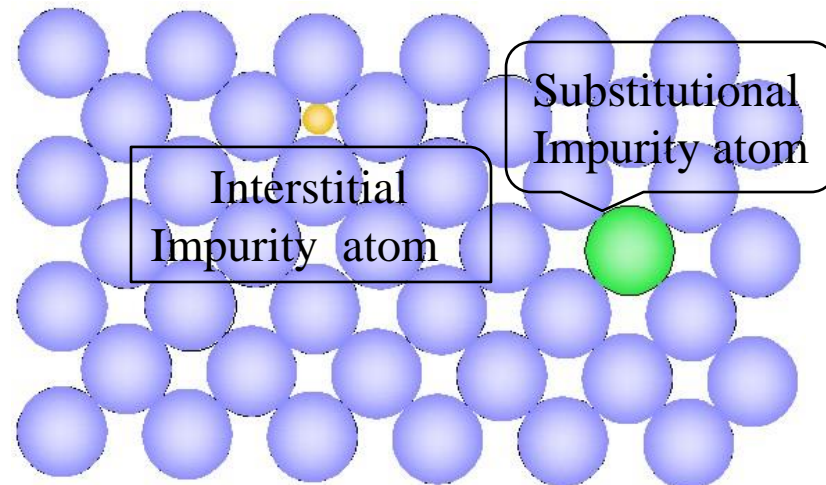
固溶体分为类(按位置):

置换固溶体

(*Substitutional Solid Solution*)

间隙固溶体

(*Interstitial Solid Solution*)



## 1.2合金的晶体结构

### 固溶体

固溶体分为类:

按溶解度: 有限固溶体和无限固溶体

按规律: 无序固溶体和有序固溶体

影响溶解度的因素: (143页)

- 1.原子尺寸因素(*Atomic size factor*)
- 2.晶体结构 (*Crystal structure*)
- 3.电负性 (*Electronegativity*)
- 4.化学价 (*Valences*)

固溶强化:

通过溶入某种溶质元素来形成固溶体而使金属的强度、硬度提高的现象。

原因: 晶格畸变, 位错阻力, 滑移困难

## 1.2合金的晶体结构

### 金属化合物

**金属化合物** (*metallic compound*) : 合金组元间相互作用所形成的一种晶格类型及性能均不同于任一组元的合金固相。

金属化合物

正常价化合物

电子化合物

间隙化合物

符合化合物**原子价律**规的金属间化合物。它们具有严格的化合比，成分固定不变。它的结构与相应分子式的离子化合物晶体结构相同，如分子式具有AB型的正常价化合物其晶体结构为NaCl型，多为离子化合物，例如MgPb, MnS

## 1.2 合金的晶体结构

### 金属化合物

**金属化合物** (*metallic compound*) : 合金组元间相互作用所形成的一种晶格类型及性能均不同于任一组元的合金固相。

金属化合物

正常价化合物

电子化合物

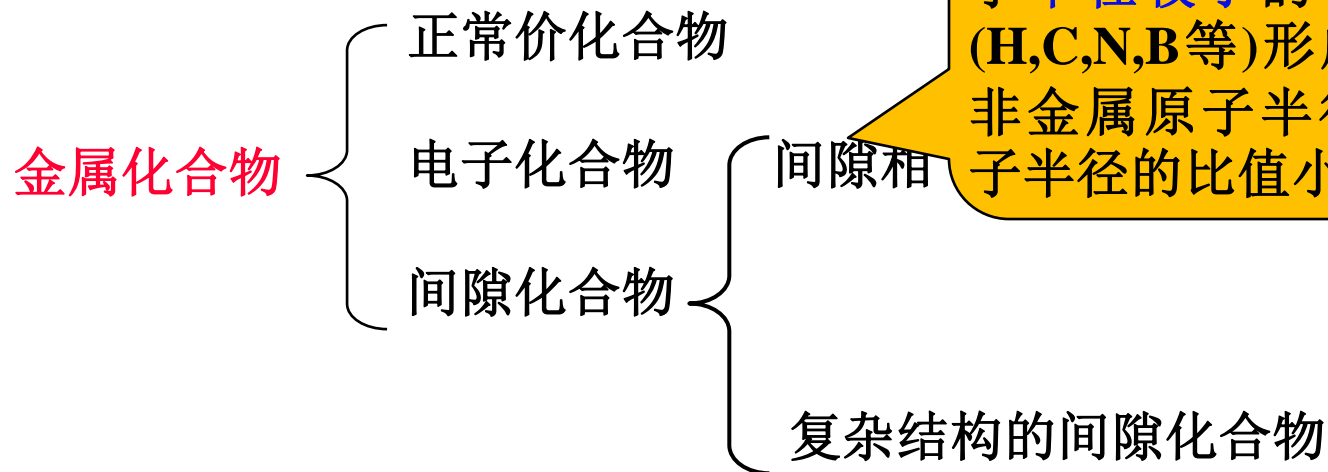
间隙化合物

指当化合物中价电子浓度一定时,形成的化合物晶格类型相同。电子化合物的熔点和硬度都很高,而塑性较差,是有色金属中的重要强化相。

## 1.2 合金的晶体结构

### 金属化合物

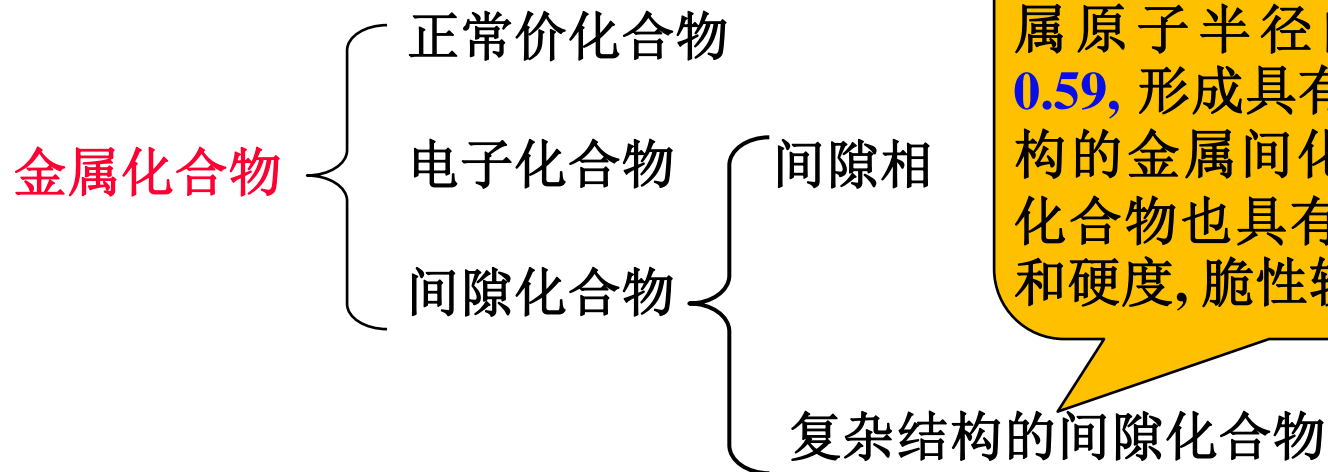
**金属化合物** (*metallic compound*) : 合金组元间相互作用所形成的一种晶格类型及性能均不同于任一组元的合金固相。



## 1.2 合金的晶体结构

### 金属化合物

**金属化合物** (*metallic compound*) : 合金组元间相互作用所形成的一种晶格类型及性能均不同于任一组元的合金固相。

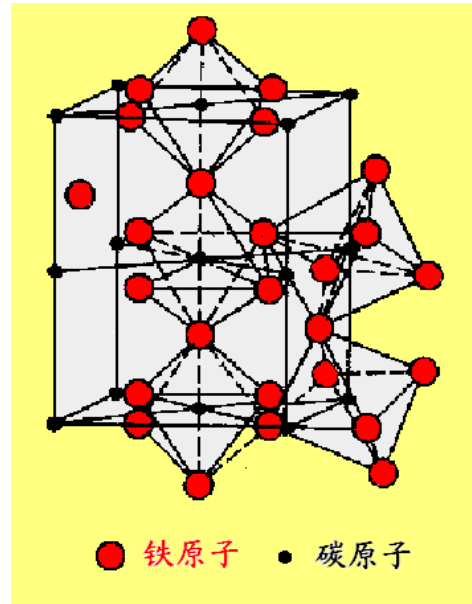


非金属原子半径与金属原子半径的比值大于**0.59**, 形成具有复杂晶体结构的金属间化合物, 间隙化合物也具有很高的熔点和硬度, 脆性较大。

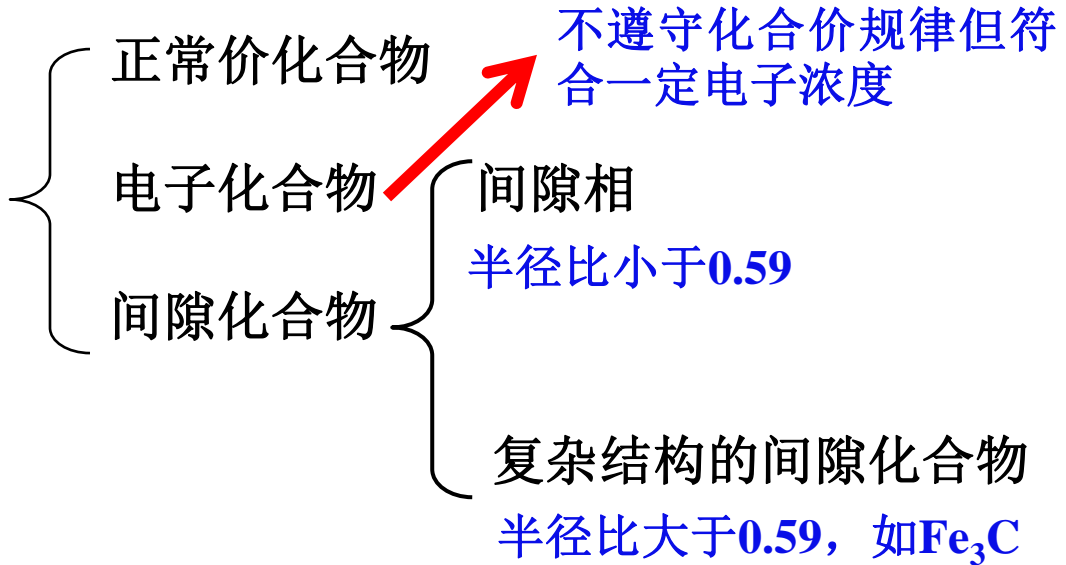
# 1.2合金的晶体结构

## 金属化合物

**金属化合物 (metallic compound)** : 合金组元间相互作用所形成的一种晶格类型及性能均不同于任一组元的合金固相。



Fe<sub>3</sub>C



**金属化合物特点:** 熔点较高, 硬度高, 脆性大

间隙相? 间隙固溶体?

## 1.2合金的晶体结构

### 固溶体和金属化合物的比较

#### 晶体结构:

- 固溶体的晶体结构特征：**与组元之一的溶剂的晶体结构相同。**
- 金属化合物的晶体结构特征：**与任一组元的晶体结构都不相同，而是一种新的结构。**

#### 性能:

- 固溶体的性能特点：**强度和硬度提高，塑性和韧性有所下降。**
- 金属化合物的性能特点：**强度、硬度提高，脆性较大。**

#### 在合金中的作用:

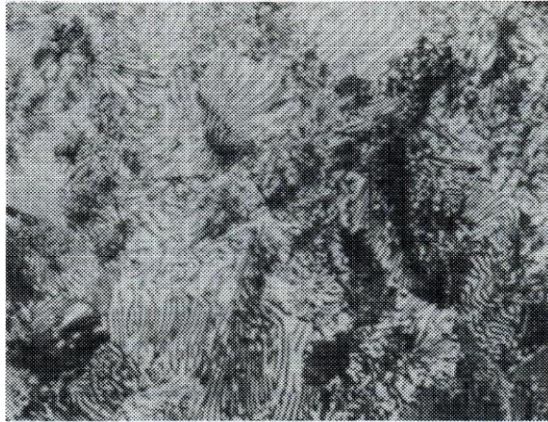
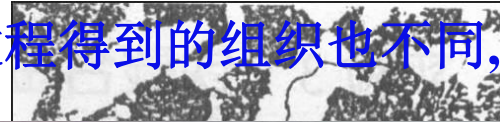
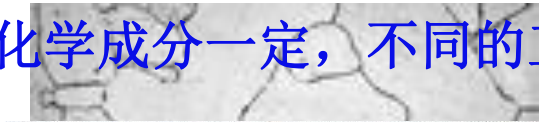
- 固溶体通常作为合金的基体。
- 金属化合物通常作为合金中的强化相。

## 1.3 金属材料的组织

**组织 (*microstructure*)**：金属材料内部的微观形貌。

**组织的决定因素**： 1.化学成分 2.工艺过程

化学成分一定，不同的工艺过程得到的组织也不同，如：



(b)

$w(C)=1.2\%$ (珠光体+二次渗碳体)  $w(C)=1.2\%$ 球化退火(球化体)



组织？ 相？

(c)  $w(C)=0.77\%$ (珠光体)

(d)  $w(C)=1.2\%$ (珠光体+二次渗碳体)

## 1.3 金属材料的组织

组织与性能的关系：



注意：

(1) 在某些情况下，金属的组织名称相同，组成相也相同，但晶粒形状、大小不同，则它们的性能也不同。

(2) 在某些合金中，在显微镜下观察它们的组织，组成相相同，且形状、大小无明显差异，只是其成分有所不同，这时表现出来的性能也不相同。

## 2.3 工艺性能

### 铸造性

浇注铸件时，液态材料能充满铸型并获得优质铸件的性能。

铸造性的好坏与液态材料的流动性、收缩率、偏析等因素有关。

### 可锻性

材料是否易于进行压力加工的性能。

可锻性的好坏主要以材料的塑性和变形抗力来衡量。

### 焊接性

材料是否易于焊接在一起并能保证焊缝质量的性能。

焊接性的好坏一般用焊接处出现各种缺陷的倾向来衡量。

## 2.3 工艺性能

### 切削加工性

材料是否易于切削加工的性能。

切削加工性与材料的种类、化学成分、硬度、韧性、导热性以及内部组织状态等有关。

切削加工性好的材料，切削容易，刀具磨损小，加工表面光洁。

在其它条件相同时，切削加工性的好坏与硬度有着密切的关系。

一般而言，有利于切削的硬度为160~230HBS。