



机械工程材料及热加工工艺

安玉民，副教授

河北工业大学，机械工程学院

邮箱：anyumin@hebut.edu.cn

绪论

第1章 机械工程材料的性能

第2章 金属的晶体结构与结晶

第3章 合金的晶体结构与相图

第4章 铁碳合金相图和碳钢

第5章 钢的热处理

第6章 合金钢

第7章 铸铁

第8章 有色金属及其合金

第9章 非金属材料与新型材料

第10章 铸造成型

第11章 锻压成型

第12章 焊接与胶接成形

第13章 非金属材料成形

第14章 机械零件材料及毛坯的选择与质量检验



2.1金属的晶体结构

2.2金属的实际结构和晶体缺陷

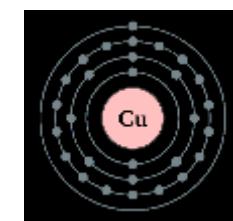
2.3金属的结晶与铸锭组织

首先来看看常见的金属材料



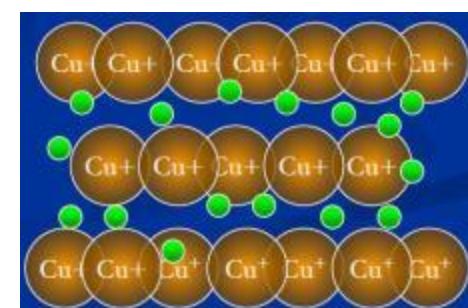
金属原子的特点：

最外层价电子少，与原子核的联系微弱，在相邻原子核电场的作用下，原子容易失去外层电子，变成外层为8个电子的正离子，而所有离开原子的价电子在各金属正离子之间自由运动形成围绕金属正离子运动的电子云。



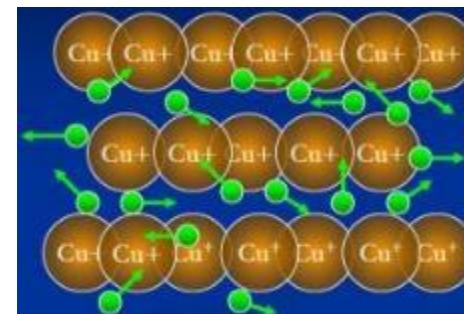
金属键：

这些离开原子的价电子并不专属于某一特定的正离子，而是在电子云中自由运动，成为与若干正离子相吸引的电子。金属正离子和自由电子之间相互吸引而将所有的离子结合在一起，这种结合方式就是金属键。



金属键的特点

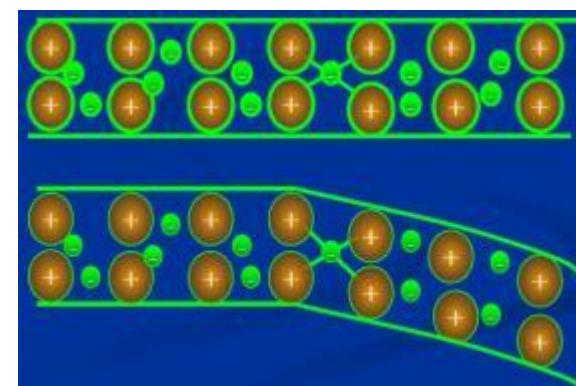
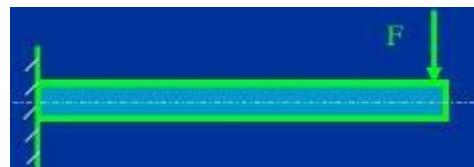
- 自由电子的存在；
- 无方向性，由于维持离子在一起的电子并不固定在某一位置上，所以金属键无方向性。



正是由于金属键的存在及金属键的特点，使得由金属键结合的金属材料具有以下特性：

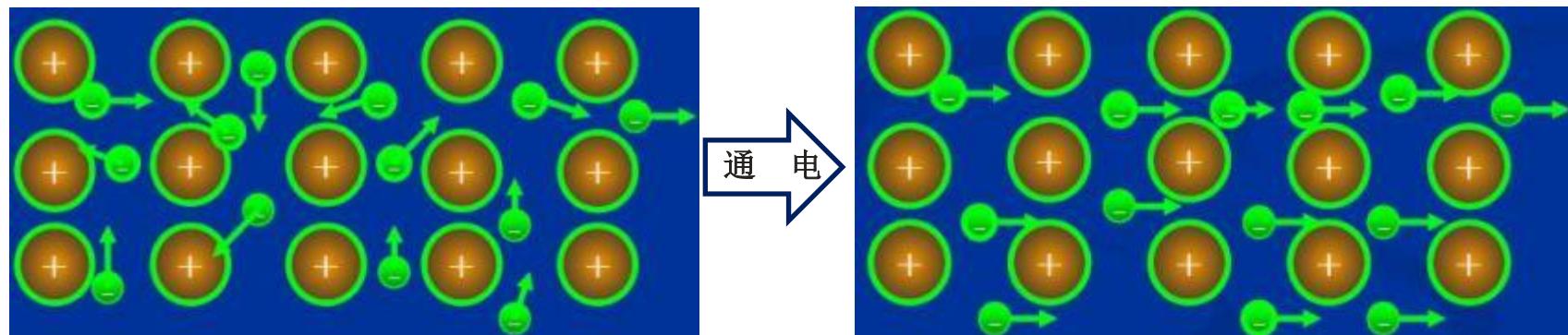
1. 良好的塑性

金属键的无方向性，使得当金属晶体受外力作用而变形（如弯曲时）时，金属原子便改变它们彼此之间的位置关系，尽管金属原子发生了位移，但自由电子的连接作用并没变，只是金属键方向随之变动，金属键没有被破坏，宏观上表现出材料具有良好的塑性。



2. 良好的导电性

由于在金属晶体中，自由电子在金属中作穿梭运动，所以在外电场作用下，**自由电子定向运动，产生电流**，使得金属材料具有良好的导电性。而加热时，因为金属原子振动加剧，阻碍了自由电子作穿梭运动，因而使得金属电阻率一般和温度呈正相关。



3. 良好的导热性

温度是分子平均动能的量度，**自由电子**运动时**与金属离子碰撞**把能量从温度高的部分传到温度低的部分，从而使整块金属达到相同的温度，所以金属导热性能一般很好。



4. 美丽的金属光泽

由于自由电子很容易被激发，可吸收所有频率的光，然后很快释放出各种频率的光，因此绝大多数金属具有银白色或钢灰色光泽。而某些金属（如铜、金、铅等）由于较易吸收某些频率的光而呈现较为特殊的颜色。当金属为粉末状时，金属吸收可见光后辐射不出去，所以呈黑色。当然，由于金属的自由电子模型过于简单化，还不能解释金属晶体为什么有导体、绝缘体和半导体之分。要解释这些现象还需要同学们学习量子理论方面的知识。

自然界中的物质按原子（离子、分子）聚集的组态可分为晶体和非晶体两大类。

晶体与非晶体的最本质差别在于微观结构的不同。

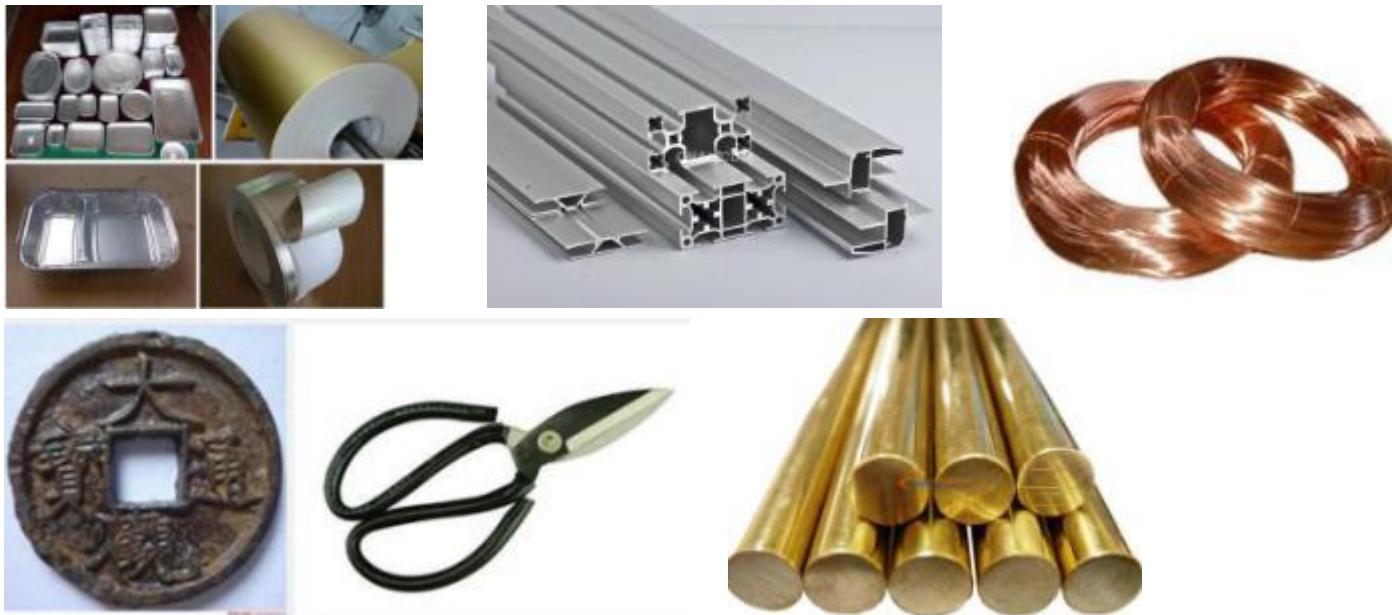
组成晶体的原子、离子、分子等质点是规则排列的（长程序），如金属、食盐、单晶硅等。

金属及合金在大多数情况下都是晶体，如常见的金属材料Fe、Al、Cu及其合金都是晶体。

这些金属晶体是由金属离子间以金属键结合在一起的，因此都具有较好的塑性及导电性，但为什么同样以金属键结合的铁、铝等材料在塑性上又存在很大的差异呢？

»»» 第2章 金属的晶体结构与结晶

常见的金属材料铁、铝、铜。



材料的性能不仅与其组成原子的本性及原子间的结合键有关，还与晶体中原子排列的方式有关，即晶体结构有关。

晶体结构：晶体中实际质点（原子、离子或分子）的具体排列情况。

晶体结构是决定固态金属的物理、化学和力学性能的基本因素之一。

因此下面介绍描述晶体中原子排列的一些基本概念，由于金属材料的晶体结构相对简单，因此以金属晶体为例进行说明。

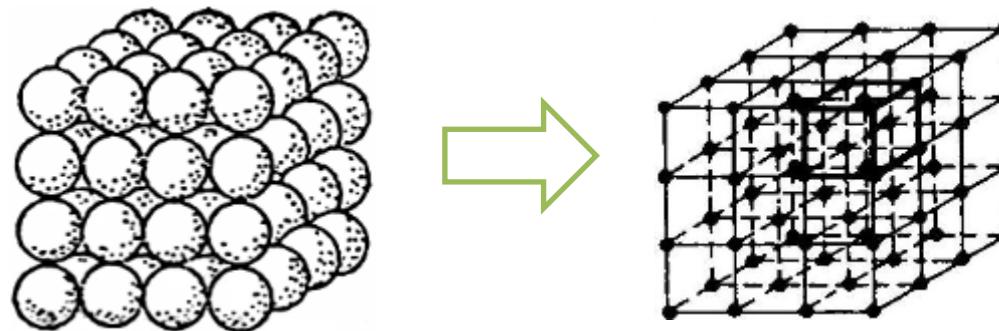
»»» §2.1 金属的晶体结构—§2.1.1 晶体结构的基础知识

1. 晶格和晶胞

为了便于描述和研究这些原子（离子、分子）的排列规律，通常将实际晶体结构简化为完整无缺的理想晶体，并近似地把原子（离子、分子）看成是不动的等直径钢球，且在三维空间内紧密堆积，没有局部排列的缺陷。

用假想的平行直线将所有的质点中心连接起来，构成一个三维空间的几何格架，图中各直线的交点称为结点。这些结点所形成的空间点的阵列称为空间点阵

晶格：用假想的直线将这些结点连接起来所形成的三维空间格架。

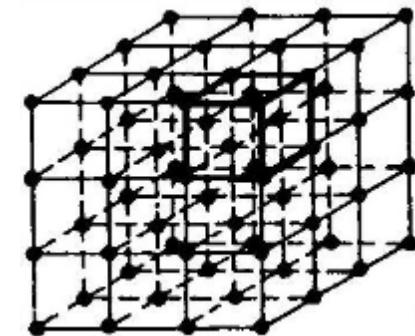


晶格能直观地表达晶体中原子的排列规律，而晶格中的原子排列为周期性重复排列

晶胞

为了描述晶体中原子的排列规律，我们从晶格中选取一个能代表晶体原子排列规律的最小几何单元称为晶胞。

如图所示，一般是取一个最小的平行六面体作为晶胞，可见晶胞在三维空间重复堆砌就可构成晶格。



2. 晶格常数和晶系

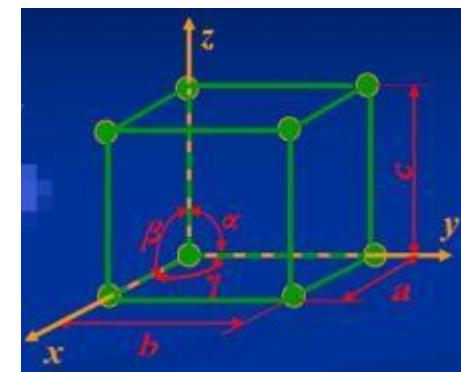
取晶胞角上的某一结点（习惯取左下角后面一结点）作为原点，沿其三条棱边作坐标轴X、Y、Z，并以三棱边的长度 a 、 b 、 c 及各边间的夹角 α 、 β 、 γ 这六个参数来表示晶胞的形状和大小。

晶格常数

晶胞各边的长度 a 、 b 、 c 称为晶格常数，单位为nm。

金属的晶格常数大都为0.1~0.7nm。

在晶体学中，通常按晶胞中的三个棱边的长度及夹角是否相等，还有夹角是否为直角等原则，将全部晶体分成了7种类型，即7个晶系。



»»» §2.1 金属的晶体结构—§2.1.1 晶体结构的基础知识

法国晶体学家布拉斐

(Bravais) 曾证明在7个晶系中存在着7种简单晶胞(晶胞中原子数为1)和7种复杂晶胞(晶胞中原子数在2以上),即14种晶胞。

立方晶系 (等轴晶系)

(cubic system) 、 **四方晶系**

(tetragonal system) 、 **正交晶系**

(orthorhombic system) 、

三方晶系 (trigonal system) 、

六方晶系 (hexagonal

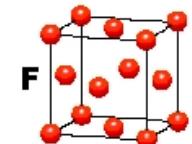
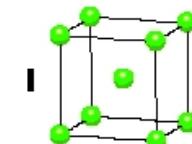
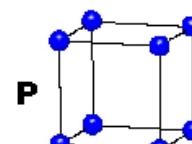
system) 、 **单斜晶系**

(monoclinic system) 、 **三斜晶系**

(triclinic system) 。

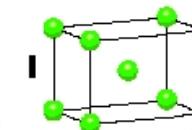
CUBIC

$$a = b = c \\ \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



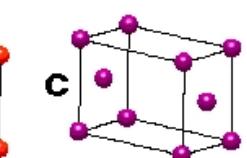
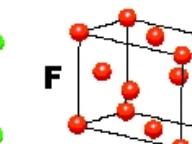
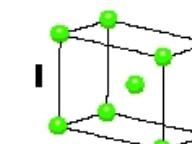
TETRAGONAL

$$a = b \neq c \\ \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



ORTHORHOMBIC

$$a \neq b \neq c \\ \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

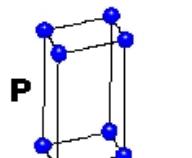
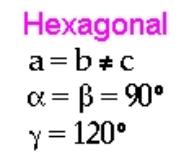
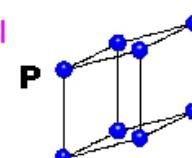


TRIGONAL

Two possible settings

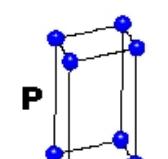
Rhombohedral

$$a = b = c \\ \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$$



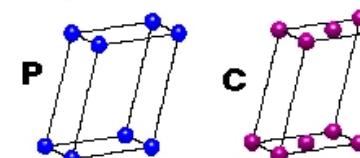
HEXAGONAL

$$a = b \neq c \\ \alpha = \beta = 90^\circ \\ \gamma = 120^\circ$$



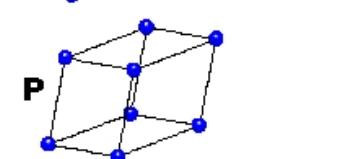
MONOCLINIC

$$a \neq b \neq c \\ \alpha = \gamma = 90^\circ \\ \beta \neq 120^\circ$$



TRICLINIC

$$a \neq b \neq c \\ \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$$



4 Types of Unit Cell

- P = Primitive
- I = Body-Centred
- F = Face-Centred
- C = Side-Centred

+
7 Crystal Classes
→ 14 Bravais Lattices

1. 纯金属的晶体结构

由元素周期表中可以看出，常见的纯金属晶体结构主要有以下三种

体心立方晶格

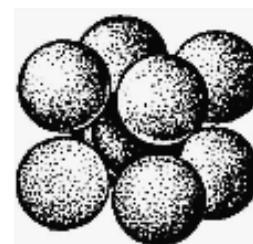
面心立方晶格

密排六方晶格

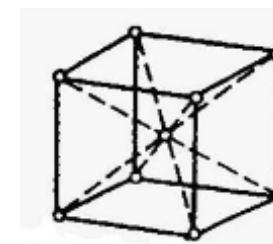
(1) 体心立方晶格 (b.c.c)

Body-Centred Cubic Lattice

在立方体的八个角点上各有一个与相邻晶胞共有的原子，并在立方体的中心有一个原子。



模型



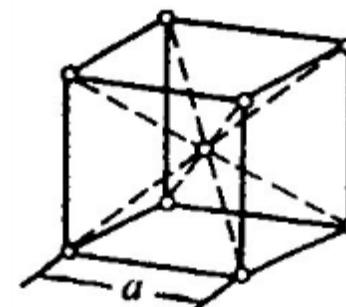
晶胞

晶格常数

$a=b=c$ ，故只用 a 表示即可

$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

属于体心晶格的金属有钠、钾、铬、钼、钨、钽、铌、 α -Fe等

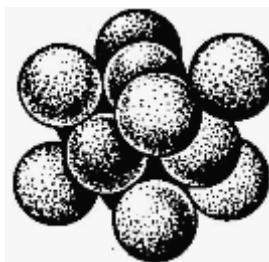




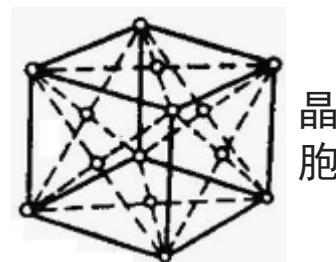
(2) 面心立方晶格 (f.c.c)

Face-Centred Cubic Lattice

在立方体的八个角点和六个面的中心上，各有一个与相邻晶胞共有的原子。



模型

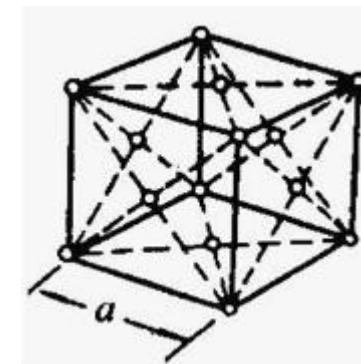


晶胞

晶格常数

 $a=b=c$, 故只用 a 表示即可 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 属于面心立方晶格的金属有：金、银、镍、铝、铜、铅、 γ -Fe等

温度在912~1394°C的铁

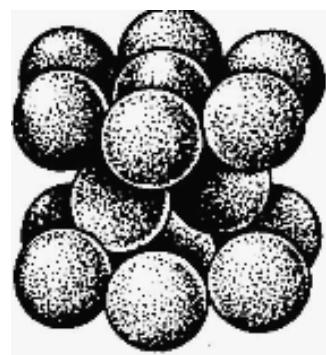




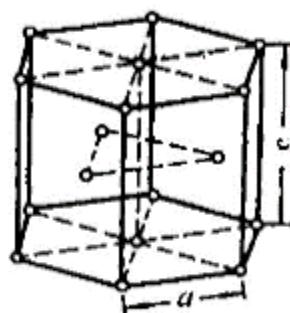
(3) 密排六方晶格 (c.p.h)

Close-Packed Hexagonal Lattice

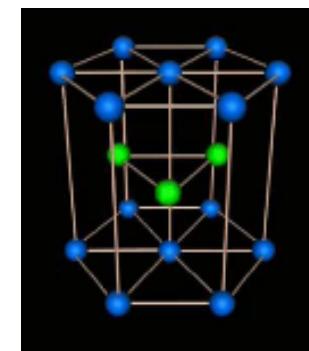
正六棱柱体，在上下两面的角点和中心，各有一个与相邻晶胞共有的原子，并在上下两面中间有三个原子



模型



晶胞

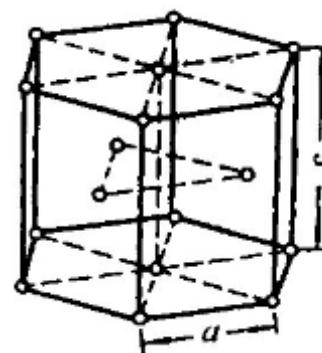


晶格常数

用六棱柱底面的边长 (a, b) 和高 (c) 表示

$$a=b \neq c, \quad c/a = 1.633, \quad \alpha = \beta = 90^\circ, \quad \gamma = 120^\circ;$$

属于密排六方晶格的金属有镁、锌、镉、铍等。





2. 晶胞原子数

指一个晶胞内所包含的原子数目。

由于晶体可看做是由许多晶胞堆砌而成的，故立方晶胞中结点处的原子为8个晶胞所共有，六方晶胞中结点处的原子为6个晶胞所共有，晶面上的原子为2个晶胞所共有，只有晶胞内的原子才完全为1个晶胞所独有。

体心立方晶格：晶胞原子个数n=2，

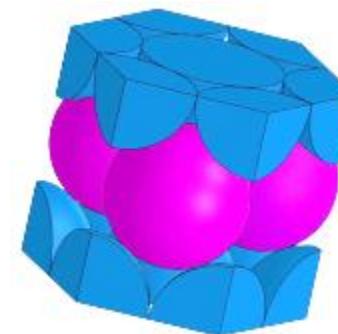
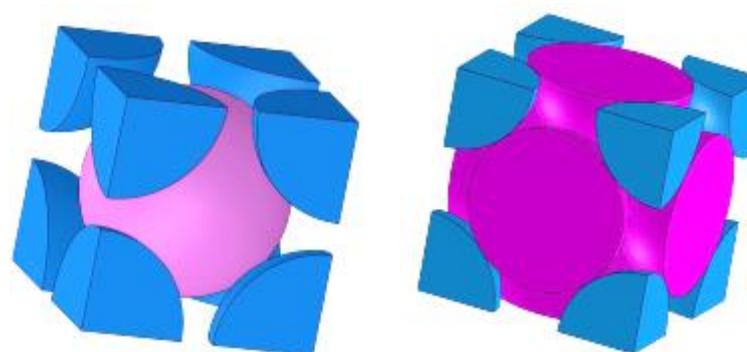
$$8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$$

面心立方晶格：晶胞原子个数n=4，

$$8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4$$

密排六方晶格：晶胞原子个数n=6，

$$12 \times \frac{1}{6} + 2 \times \frac{1}{2} + 3 = 6$$





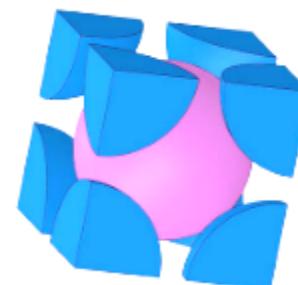
3. 原子半径

晶胞中原子密度最大方向上相邻原子间距的一半尺寸

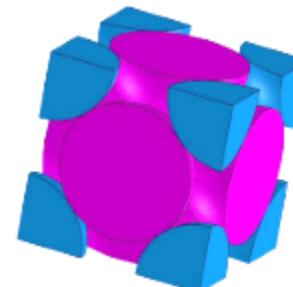
根据前面的假设，把原子作为等直径的钢球，并认为它们之间是紧密排列时彼此相切的。

原子半径

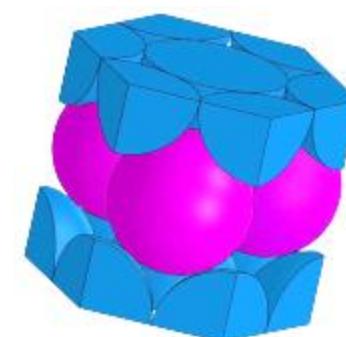
体心立方晶格：体对角线的 $\frac{\sqrt{3}}{4}$ ， $r = \frac{\sqrt{3}}{4} a$



面心立方晶格：面对角线的 $\frac{\sqrt{2}}{4}$ ， $r = \frac{\sqrt{2}}{4} a$



密排六方晶格：底面边长的 $\frac{1}{2}$ ， $r = \frac{1}{2} a$





»»» §2.1 金属的晶体结构—§2.1.2 三种常见的金属晶格

4. 致密度与配位数

不同类型的晶格，其内部原子排列的密集情况不一样，用致密度和配位数两个参数来描述其排列的密集程度。

致密度：晶胞中原子本身所占有的体积百分数

体心立方晶格： $K=0.68$

$$K = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{a^3} = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi (\frac{\sqrt{3}}{4}a)^3}{a^3} \approx 0.68$$

面心立方晶格： $K=0.74$

$$K = \frac{4 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{a^3} = \frac{4 \times \frac{4}{3} \pi (\frac{\sqrt{2}}{4}a)^3}{a^3} \approx 0.74$$

密排六方晶格： $K=0.74$

$$K = \frac{6 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{6 \times \frac{\sqrt{3}}{4} a^3} = \frac{6 \times \frac{4}{3} \pi (\frac{1}{2}a)^3}{6 \times \frac{\sqrt{3}}{4} a^2 \times c} = \frac{6 \times \frac{4}{3} \pi (\frac{1}{2}a)^3}{6 \times \frac{\sqrt{3}}{4} \times 1.633 a^3} \approx 0.74$$

$$K = \frac{\text{晶胞原子数} \times \text{原子的体积}}{\text{晶胞的体积}}$$

由此可以看出，体心立方晶胞中原子占体积的68%，面心立方和密排六方晶胞中原子占体积的74%，其余的32%和26%的体积则为晶格间隙。



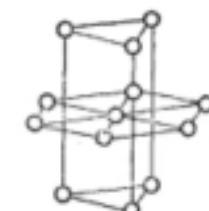
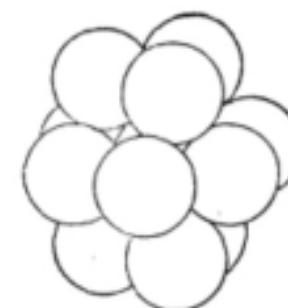
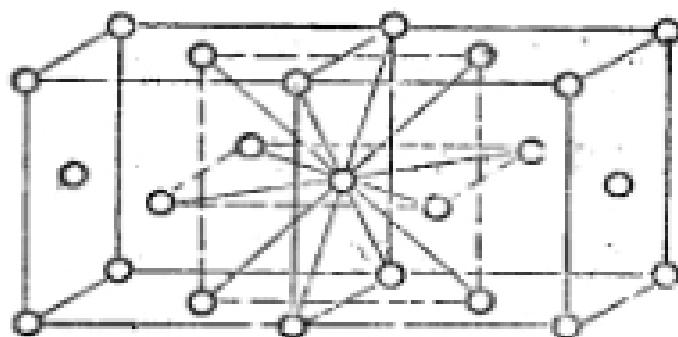
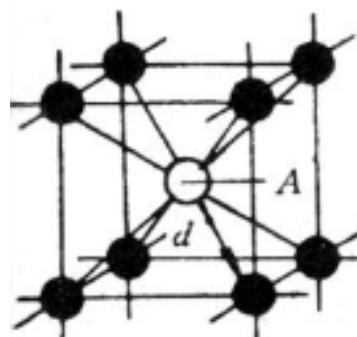
配位数

晶体中与任一原子最近的且相等的原子数目，配位数越大则原子排列的致密度越高。

体心立方晶格配位数：8

面心立方晶格配位数：12

密排六方晶格配位数：12

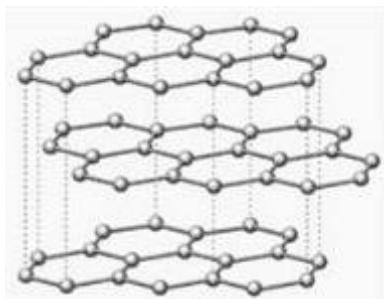


三种晶格结构的比较

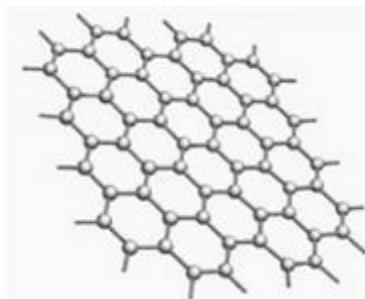
晶体结构	原子数	原子半径	配位数	致密度
体心立方	2	$r = \frac{\sqrt{3}}{4} a$	8	0.68
面心立方	4	$r = \frac{\sqrt{2}}{4} a$	12	0.74
密排六方	6	$r = \frac{1}{2} a$	12	0.74

当金属从高配位数结构向低配位数结构发生同素异构转变时，随着致密度的减小和晶体体积的膨胀，原子半径同时发生变化。由此可见，同种原子处于不同的晶格中，其原子半径也是不同的。

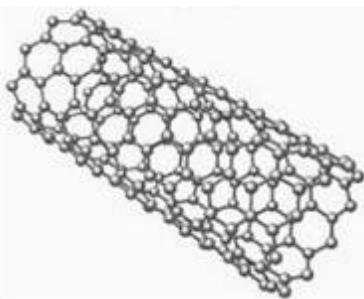
»»» §2.1 金属的晶体结构—§2.1.3 晶面指数及晶向指数



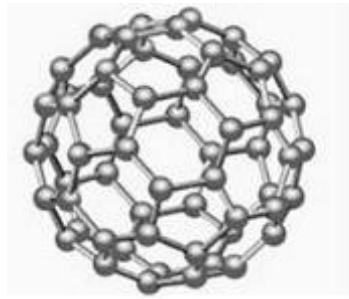
石墨



石墨烯



碳纳米管



富勒烯

各向异性：沿晶格的不同方向，由于原子排列的周期性和疏密程度不尽相同，而导致晶体在不同方向的物理、化学如弹性模量、硬度、断裂抗力、屈服强度、热膨胀系数、导热性、电阻率等特性也不同。

各向异性作为晶体的一个重要特性具有相当重要的研究价值。常用密勒指数来标志晶体的不同取向。密勒指数由英国晶体学家W.H. Miller于1939年提出，用来对晶向和晶面进行标定。

晶面：在晶体中由一系列原子组成的平面。表示晶面的符号。

晶向：任意一条两个原子之间的连线成为原子列，其所指方向。表示晶向的符号。

»»» §2.1 金属的晶体结构—§2.1.3 晶面指数及晶向指数

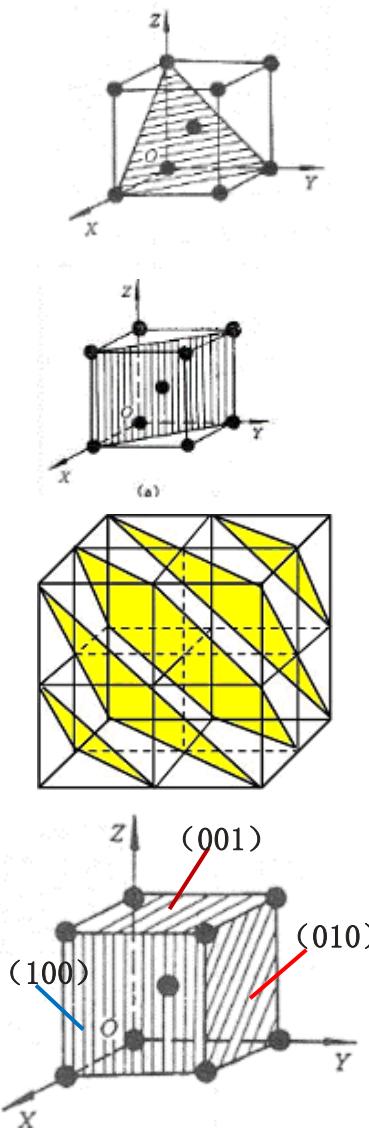
1. 晶面指数的标定

- (1) 设坐标系, 求截距: 以晶胞的三个棱边作三维坐标的坐标轴, 以晶格常数为单位长度, 求出所求晶面在三个坐标轴上的截距。
- (2) 取倒数: 将所得的三个截距值变为倒数。
- (3) 化整数: 将所得数值化为最小整数。
- (4) 列括号: 用圆括号括起, 就成为该晶面的晶面指数 $(h k l)$, 这三个数不用标点分开。若截距为负, 则在相应的指数上方加负号。

注: 一个晶面指数 $(h k l)$ 不是指的一个晶面, 而是代表一组互相平行的晶面。

在立方晶系中, 由于原子排列的排列存在高度的对称性, 这些晶面可看成是性质相同的等同晶面, 如 (100) 、 (010) 和 (001) 等晶面。

将那些原子排列完全相同, 只是空间位向不同的各组晶面称为晶面族, 用 $\{h k l\}$ 表示。



»»» §2.1 金属的晶体结构—§2.1.3 晶面指数及晶向指数

2. 晶向指数的标定

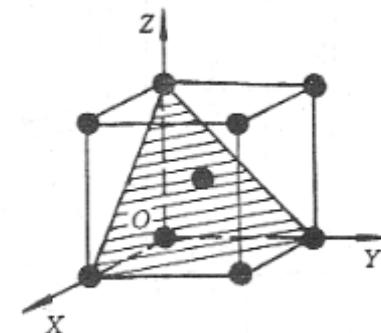
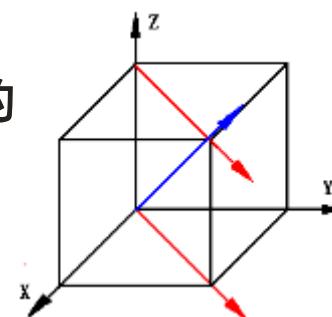
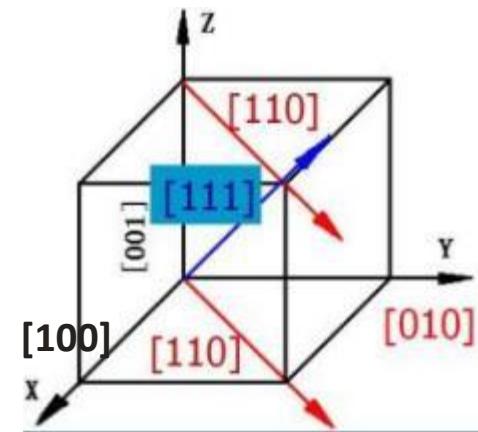
(1) 以晶胞的三个棱边作三维坐标的坐标轴, 以晶格常数为单位长度, 过原点引一平行于待定晶向的直线, 求出该直线上任一结点的坐标值。

(2) 将空间坐标值按比例化为最小简单整数, 加上方括号, 即为晶向指数 $[u v w]$ 。如果有负值则在相应指数上加负号。

$[uvw]$ 代表的是一组互相平行、方向一致的所有晶向。

原子排列完全相同, 只是空间位向不同的各组晶向称为晶向族, 用 $\langle hkl \rangle$, 如 $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 属于一个晶向族。

注: 指数相同的晶面和晶向是互相垂直的





3. 晶向及晶面的原子密度

晶向的原子密度：该晶向上单位长度上的原子个数

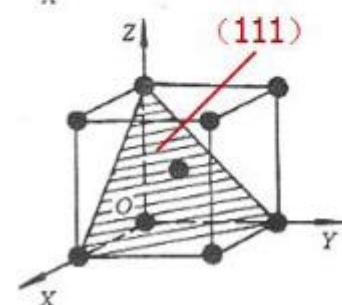
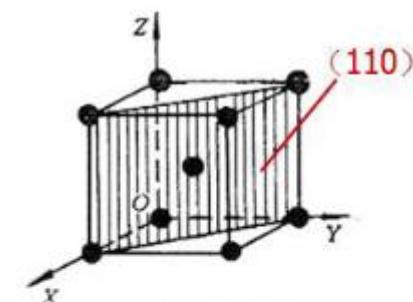
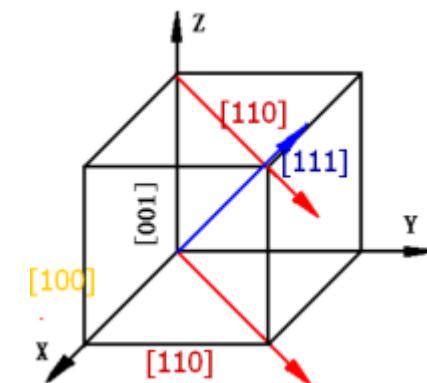
晶面的原子密度：该晶面上单位面积中的原子个数

体心立方晶格的晶向原子密度

体心立方晶格的晶向原子密度和晶面原子密度如表中所示，
从表中可以看出，晶体中不同晶面和晶向上的原子分布密度
是不同的。

在体心立方晶格中，原子密度**最大的晶向为<111>**

原子密度**最大的晶面为{110}**



»»» §2.1 金属的晶体结构—§2.1.3 晶面指数及晶向指数

体心立方晶格的晶向原子密度

晶向指数	体心立方晶格	
	晶向原子 排列示意图	晶向原子密度 (原子数/长度)
$\langle 100 \rangle$		$\frac{2 \times \frac{1}{2}}{a} = \frac{1}{a}$
$\langle 110 \rangle$		$\frac{2 \times \frac{1}{2}}{\sqrt{2}a} = \frac{0.7}{a}$
$\langle 111 \rangle$		$\frac{2 \times \frac{1}{2} + 1}{\sqrt{3}a} = \frac{1.16}{a}$

晶面指数	体心立方晶格	
	晶面原子 排列示意图	晶面原子密度 (原子数/面积)
$\{100\}$		$\frac{4 \times \frac{1}{4}}{a^2} = \frac{1}{a^2}$
$\{110\}$		$\frac{4 \times \frac{1}{4} + 1}{\sqrt{2}a^2} = \frac{1.4}{a^2}$
$\{111\}$		$\frac{3 \times \frac{1}{6}}{\frac{\sqrt{3}}{2}a^2} = \frac{0.58}{a^2}$

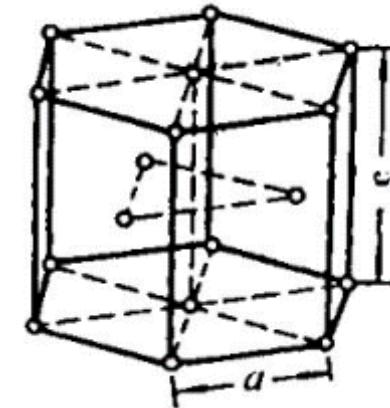
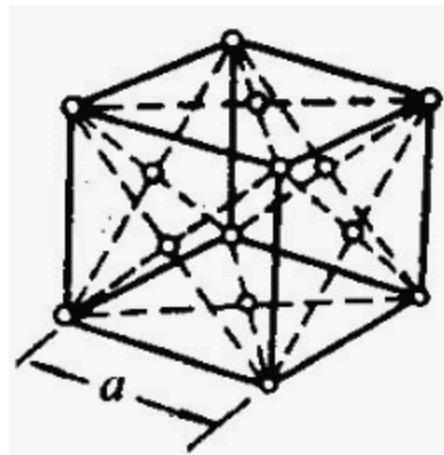
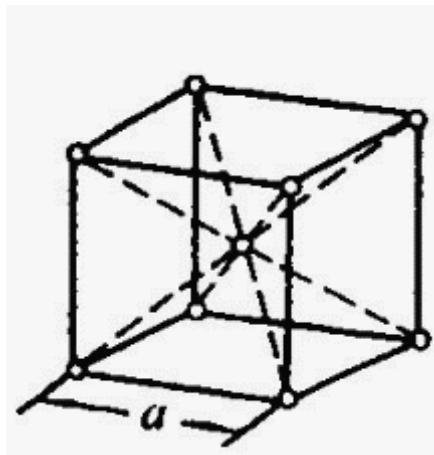
正是由于这种密度的差异，引起相互间结合力的大小的不同，从而导致了金属理想状态的单晶体在不同方向上表现出不同的性能，即各向异性。

单晶体都具有各向异性。

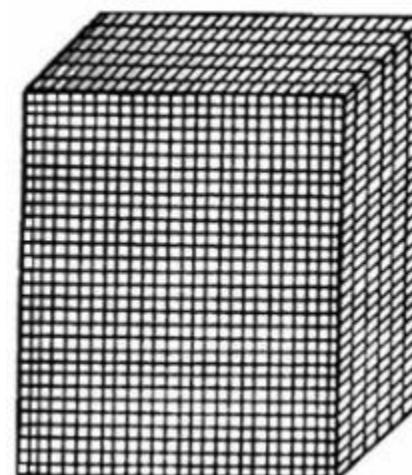
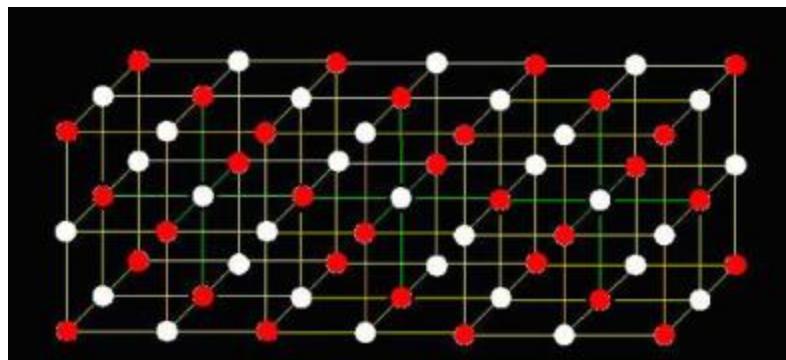


»»» §2.2 金属的实际结构和晶体缺陷

由前面我们已经知道常见金属的晶体结构有体心立方\面心立方\密排立方等晶格类型



理想的金属晶体理论上应由这些晶胞在三维空间里做周期性的常程有序的重复排列，形成原子排列位向完全一致的单晶体结构。



»»» §2.2 金属的实际结构和晶体缺陷

一、多晶体结构

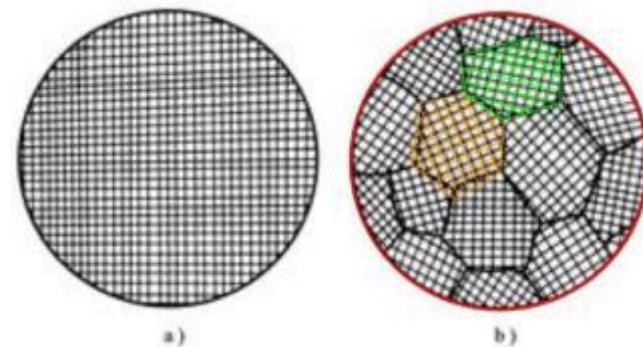
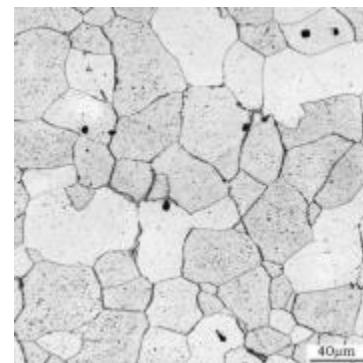
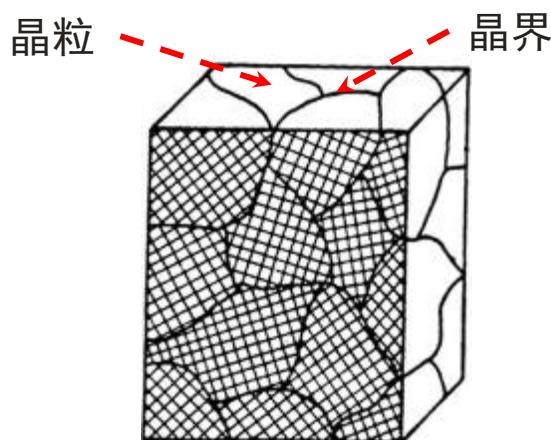
工程上实际使用的金属材料并不是一个理想的单晶体，而是一个由许多外形不规则的单晶体组成的**多晶体结构**

组成多晶体的这些单晶体称为晶粒。

晶粒和晶粒之间的交界处称为晶界。

在多晶体结构中，晶粒和晶粒之间的晶格位相皆不相同，但每一个晶粒内部的原子排列大体属于同一位向。

金属材料的晶粒一般很小，钢铁材料的晶粒尺寸仅为 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ mm，因此只有经显微镜放大后才能观察到。



图中所示为工业纯铁经化学试剂深侵蚀后在金相显微镜下所观察到的晶粒图片。

»»» §2.2 金属的实际结构和晶体缺陷

- 因为每个晶粒的**晶格位向不同**，则在同一侵蚀剂的作用下溶解的速度不同，所以呈现出**不同的色调**。
- 正因为不同晶粒内原子排列位向不同，以致每个晶粒的各向异性相互抵消，从而使得多晶体在性能上呈现出各个方向上大体相同的现象，称为**各向同性**，即大家在日常生活中所看到的金属材料在各个方向上承受拉、压等载荷的性能基本相同。
- 实际金属不仅是一个多晶体结构，而且即使在单个晶粒内部原子的排列也不是理想的排列，或多或少地偏离理想结构，存在着一些不规则排列的**缺陷**称为晶体缺陷。

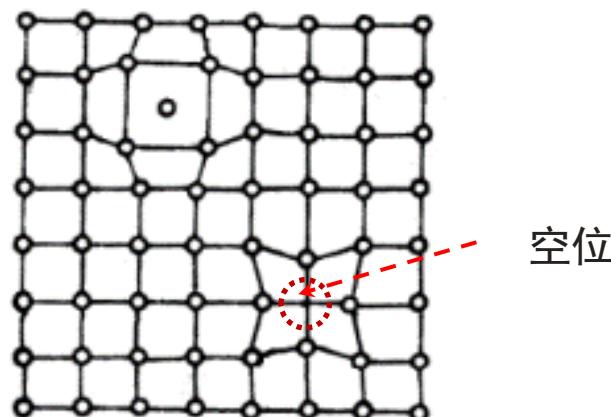
»»» §2.2 金属的实际结构和晶体缺陷

二、晶体缺陷

根据缺陷在三维空间的尺寸大小，分为**点缺陷**、**线缺陷**、**面缺陷**。

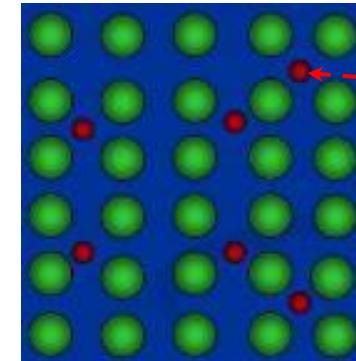
1. **点缺陷**: 空间三维尺寸都很小，不超过几个原子直径的缺陷

➤ **空位**: 晶格上没有原子的结点。晶体中的原子在结点上不是固定不动的，而是不停地进行热振动，某些能量高的原子克服周围原子对它的束缚作用，而脱离原来的结点位置，从而造成该结点处的空缺。

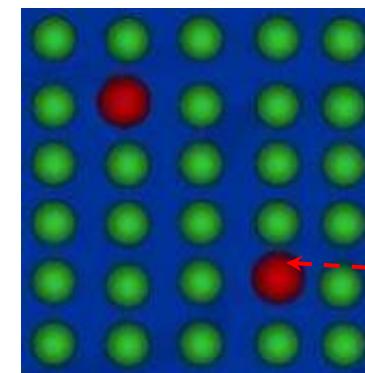


»»» §2.2 金属的实际结构和晶体缺陷

➤ **间隙原子**: 在晶格结点以外的存在的原子。当这些异类原子比金属原子半径小得多时，则异类原子存在晶格的间隙中，称为间隙原子，而晶格间隙都较小，因此间隙原子一般都是较小的碳、氮、氢等非金属原子。

间隙
原子

➤ **置换原子**: 占据晶格结点的异类原子。当异类原子与金属原子半径接近时，则异类原子可能占据晶格上的一些结点，称为置换原子。

置换
原子

点缺陷对性能的影响:

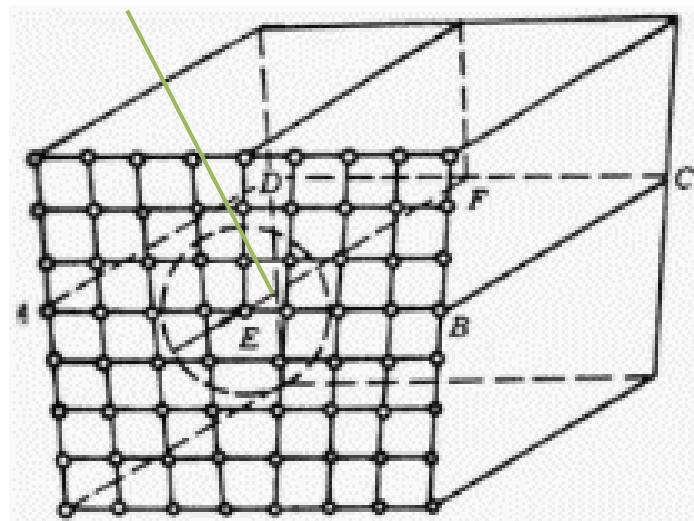
无论是空位、间隙还是置换原子，都会导致附近晶格发生歪扭，称为**晶格畸变**。晶格畸变的存在使金属的性能发生变化，如**强度升高，塑性下降**。同时空位和间隙原子的运动是金属中原子扩散的主要形式，对金属材料的热处理过程极为重要。

2. 线缺陷：它是在晶体中某处有一列或若干列原子发生了有规律的错排现象。

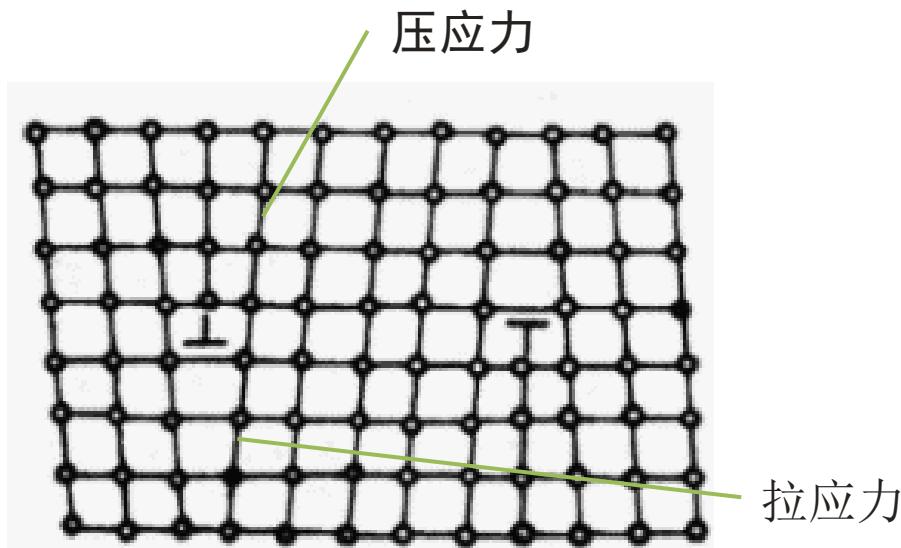
晶体中最普通的线缺陷就是位错

位错的形式有很多种，常见的是刃形位错，插入象刀刃一样的原子平面，从而使晶体沿EF线产生上、下层原子位置的错动。

错位线



刃形位错立体图



拉应力

离 EF 越近，原子的错动越大，越远，错动越小；与此同时，位错的出现使得周围原子的应力场重新分布，位错周围原子受到挤压，承受压应力，同时使得位错下部原子则受拉应力。

»»» §2.2 金属的实际结构和晶体缺陷

位错对性能的影响：

金属中位错很多，每一个位错都产生一个应力场，这些应力场彼此交互作用，从而对金属的力学性能产生很大的影响，同时金属的塑性变形主要是由位错运动引起的，因此阻碍位错运动是强化金属的主要途径。

- 减少或增加位错密度都可以提高金属的强度；
- 生产中一般是采用**增加位错**的办法提高强度，但塑性随之降低

»»» §2.2 金属的实际结构和晶体缺陷

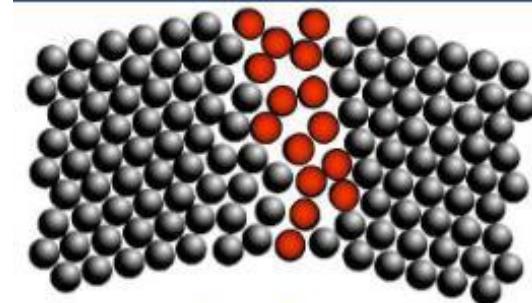
3. 面缺陷：晶体中一维尺寸很小，另两维尺寸很大的缺陷

面缺陷包括**晶界**和**亚晶界**。

晶界：晶粒与晶粒之间的交界面

晶界的特点：

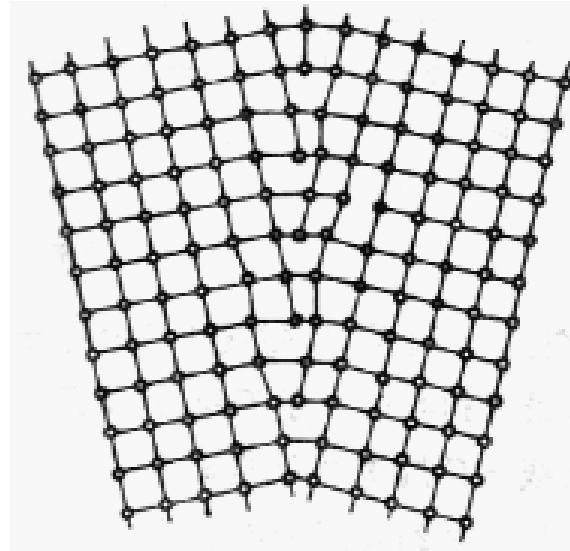
- 1) 晶界处的原子需要同时适应相邻两个晶粒的位向，从一种晶粒位向逐步过渡到另一种晶粒位向，因而晶界处的原子排列不规律，是两个不同位向的晶粒的过渡层，在多晶体结构中，相邻晶粒的位向差大多在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 之间。
- 2) 是金属中的强化部位。晶界处杂乱无章的原子排列对位错运动有阻碍作用，在宏观上则为阻碍材料的变形，为金属中的强化部分。金属的晶粒越细，晶界总面积越大，金属的强度也越高，实际使用的金属材料力求获得细的晶粒
- 3) 熔点低；
- 4) 耐蚀性差。因为晶界处能量比晶内高，有自发地向低能量状态转化的趋势，因此晶界处在高温和腐蚀剂的作用下，晶界处先溶化或腐蚀
- 5) 是相变的优先形核部位。因为晶界处原子排列不规则，容易重新聚集组合。



亚晶界：亚晶粒之间的交界

晶粒内部也不是理想的晶体，而是位向差很小的（一般不超过 3° ），称为镶嵌块的小晶块所组成，称为亚晶粒。

亚晶界其实就是一系列的刃型位错所组成的，亚晶界对金属同样也有强化作用。



不管是点缺陷、线缺陷还是面缺陷都是晶格不完整的部位，都会对金属的性能产生一定的影响。

»»» §2.3 金属的结晶

几乎所有的金属都是用矿物冶炼成液态，再由液态凝固成固态进入到工程应用中。

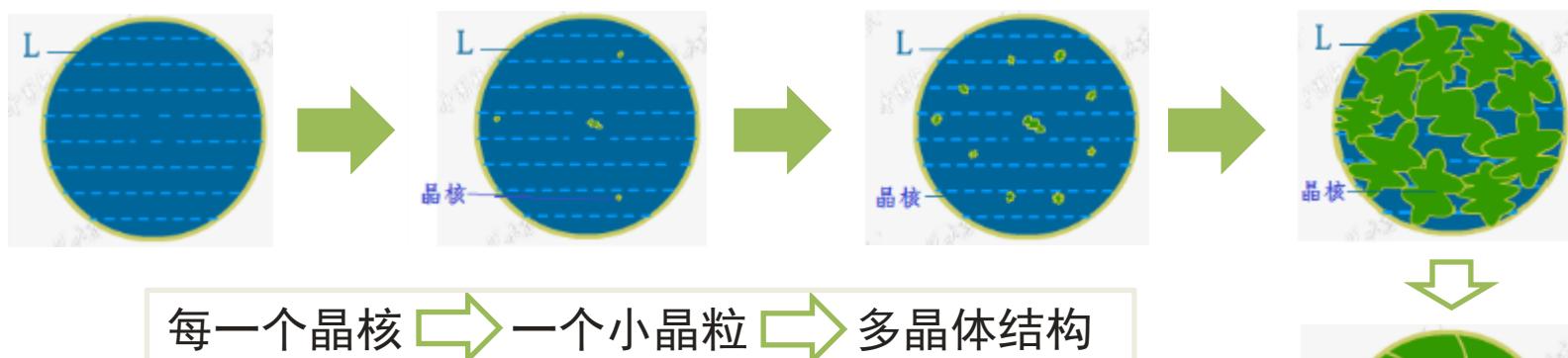
金属由液态转变为固态的过程称金属的凝固过程，而金属的凝固过程又是一个结晶过程。

作为金属生产的第一步，金属的结晶过程对金属材料的性能有很大的影响。

1. 结晶的基本过程

当液态金属冷却到理论结晶温度 T_0 以下，即具有一定的过冷度条件下，经过一段时间后形成一些微小稳定的小晶体即晶核，这段时间也称为孕育期。晶核形成后即向各个方向生长。

与此同时，在液态金属的其他地方也会出现新的晶核。晶核不断形成以及晶核不断长大这两个过程交织同时进行，直至液态金属完全消失，结晶完毕。每一个晶核最终都长成一个小晶粒，相邻两晶粒接触后便形成晶界，最后得到一个多晶体的结构。



由此可以看出，金属的结晶过程是由晶核的不断形成和晶核的不断长大两个基本过程组成，那么影响结晶后组成多晶体结构的晶粒大小必然与这两过程相关

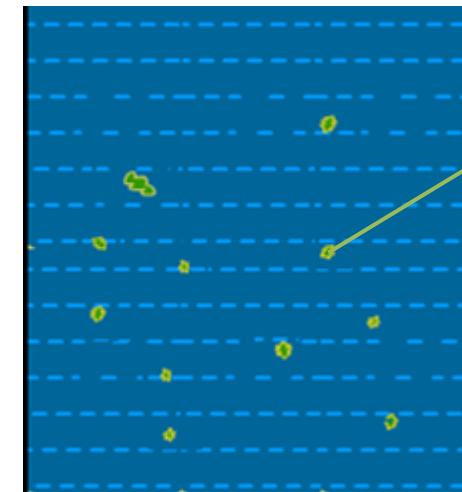


2. 结晶后晶粒的大小

1) 晶核的形成方式

- **自发成核**: 晶核可以由近程有序结构液体中规则排列的原子团形成
- **非自发成核**: 由液体中的固态杂质微粒作晶核

注: 在实际结晶过程中, 自发形核和非自发形核同时存在,
但以非自发形核方式发生结晶更为普遍



悬浮的微粒或杂质

2) 晶核的长大方式

- **均匀长大** ← 过冷度很小时
- **树枝状长大** ← 主要方式

实际金属结晶时冷却速度较大

而实际金属在结晶过程中冷却速度一般较大, 即过冷度较大, 此时晶核的生长方式如树枝形式长大。

»»» §2.3 金属的结晶

对实际金属而言，晶核长大的主要方式为**树枝状长大**

这是因为在结晶过程中晶核的棱角处散热条件好,温度低，晶粒在棱角处得到优先生长，在生长过程中，先形成树的主干,称为一次晶轴,再形成树的分支,为二次晶轴,最后得到的形状为树枝状，称为枝晶。



晶核树枝状长大示意图

3) 晶粒大小

晶粒就是由一个晶核长大的晶体

晶粒度：表示晶粒大小的一种尺寸

晶粒大小一般以单位面积的晶粒数目或以晶粒的平均直径来表示

国家标准中**晶粒度共分八级，一级最粗，八级最细**。工业生产中常用的金属材料的晶粒多为7-8级的细晶粒，晶粒尺寸为0.022mm左右。

由于测量晶粒尺寸很不方便，工业生产中常常通过**100倍显微镜**下的晶粒大小与国家标准图样相对照来进行**晶粒度的评级**。

»»» §2.3 金属的结晶

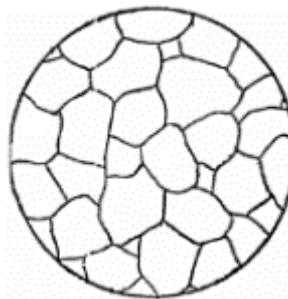
钢的晶粒度示意图 (100 X)



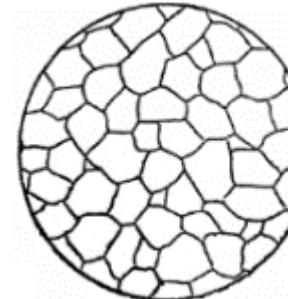
1级



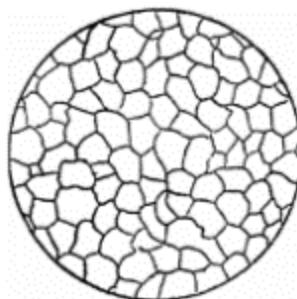
2级



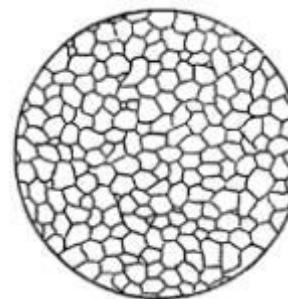
3级



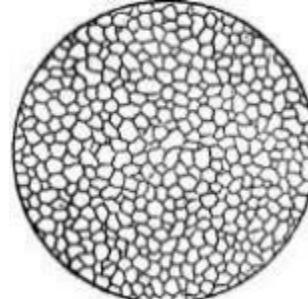
4级



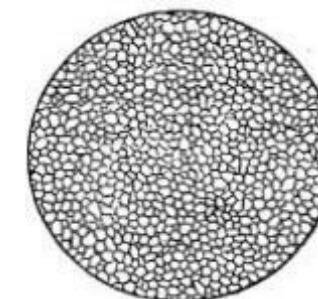
5级



6级



7级



8级

多晶体纯铁的晶粒
大小与力学性能

晶粒直径 mm	抗拉强度 MPa	屈服强度 MPa	伸长率 %
7.0	180	38	30.6
2.5	211	44	39.5
0.2	263	57	48.7
0.1	278	116	50

4. 晶粒大小对材料性能的影响

一般而言，常温下的金属材料，晶粒越细，则力学性能越好，强度、塑性、韧性越高。

如表中给出的多晶体纯铁的晶粒大小与力学性能之间的对照关系

但需值得注意的是：对于在高温下工作的金属材料，晶粒不宜过大或过小。这是因为在高温下细晶粒容易发生蠕变、易腐蚀，而粗晶粒正好相反。

5. 决定晶粒度的因素

由于金属的结晶过程是由晶核的不断形成和晶核的不断长大两个基本过程组成，因此影响结晶后晶粒大小的因素有如下两个：

- 1) 形核率 (N)：单位时间单位体积内形成晶核的数目，用字母N来表示，单位时间内形核率越高，则晶粒越细
- 2) 晶核的长大速度 (G)：单位时间晶体生长的线长度，用字母G表示，G越大，则晶粒越大。

可见形核率与长大速度的比值 N/G 越大，则晶粒越细。

如上所说，室温使用条件下的金属材料晶粒越细越好，那在生产实践中如何控制生产过程以获得细的晶粒???

»»» §2.3 金属的结晶

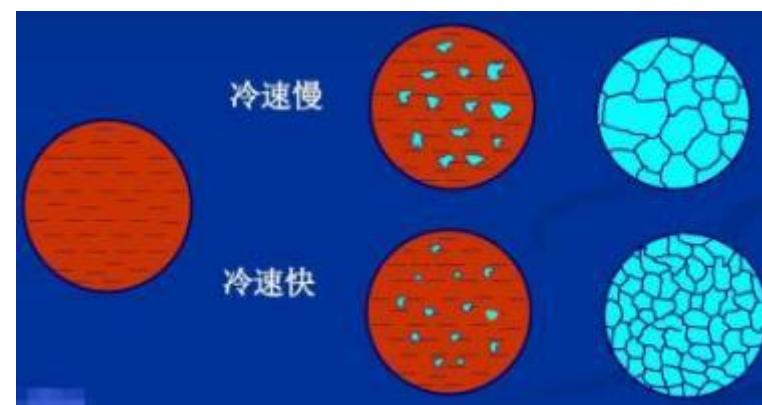
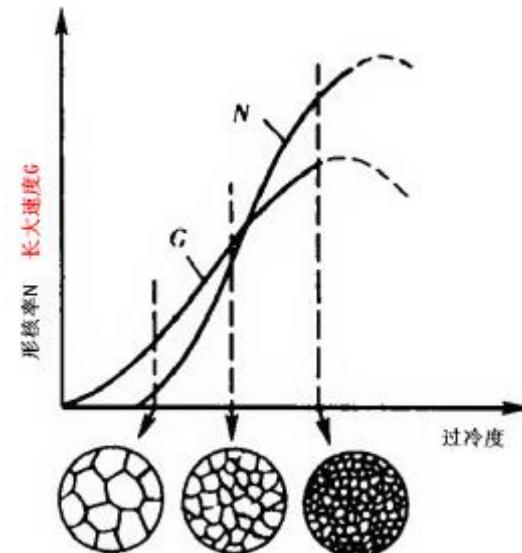
6. 控制晶粒尺寸的方法

1) 控制过冷度

如图所示为过冷度与形核率和长大速度之间的关系曲线，从中可以看出随着过冷度的增大， N / G 值增加，晶粒越细。工业生产中常采用的增加过冷度的方法

增大冷却速度：冷却速度越大，过冷度越高。如在生产中采用导热性好的金属模代替砂模来进行铸造。

在工业生产中，由于小型和薄壁铸件比大型铸件冷却速度快，因此小型和薄壁铸件所得到的组织较细





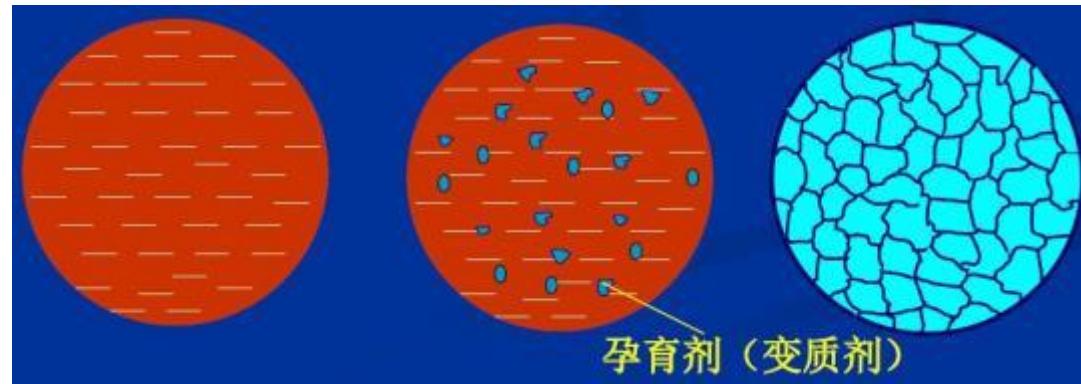
»»» §2.3 金属的结晶

2) 变质处理（又称为孕育处理）

利用非自发形核的原理，在液态金属中加入能成为外生核的物质，促进形核，提高形核率，达到细化晶粒的目的。加入的物质称为变质剂或孕育剂，铸造工业中利用此法，可生产出高强度的孕育铸铁。

但并不是加入任何物质都能起变质或孕育作用的，不同的金属液体要加入不同的物质。

铸造工业中利用此法，可生产出高强度的孕育铸铁



3) 振动、搅拌等方法

在结晶时，采用机械振动、电磁搅拌及超声波等方法打碎正在生长的树状晶，打碎后碎晶块形成新的晶核，从而增加晶核数目，同时，由于外部输入能量，又能促进形核，达到细化晶粒的目的。



感谢同学们的聆听！



河北工业大学
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

勤慎公忠