

金 属 学

中南矿冶学院金属材料系有色金属教研室编

一九七六年

毛主席语录

教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合。

理论的基础是实践，又转过来为实践服务。

分析的方法就是辩证的方法。所谓分析，就是分析事物的矛盾。

要把精力集中在培养分析问题和解决问题的能力上。

世上无难事，只要肯登攀。

目 录

第一章 金属的晶体结构与液态金属的结晶	1
§ 1 固态金属组织与结构	1
§ 2 液态金属的结晶	16
§ 3 晶核的形成与晶核长大	20
§ 4 晶体的形状和晶粒的大小	29
§ 5 金属铸锭的组织及其影响因素	34
第二章 二元合金相图	40
§ 1 和相图有关的几个名词的概念	40
§ 2 二元合金相图的绘制	41
§ 3 相律	45
§ 4 二元合金相图的基本类型及缓冷的组织(平衡组织)	46
§ 5 合金的非平衡组织与相图的关系	65
§ 6 成分过冷及其实际应用	71
§ 7 如何分析复杂相图	76
第三章 合金中相的结构及其形成规律	79
§ 1 合金中相的分类	79
§ 2 固溶体	80
§ 3 金属化合物	87
第四章 三元合金相图	93
§ 1 三元合金相图的成分表示法	93
§ 2 杠杆定律和重心定律及其应用	95
§ 3 三组元在液态和固态都无限互溶的三元相图	97
§ 4 简单共晶型三元相图	101
§ 5 固态有限溶解,并具有共晶转变的三元相图	108
§ 6 有一对组元形成不稳定化合物,并具有共晶——包晶转变(2/2)的三元相图	113
§ 7 形成稳定化合物的三元相图	118
§ 8 三元相图实例分析	119

第五章 晶体的缺陷	134
§ 1 晶体的点缺陷	134
§ 2 晶体的线缺陷——位错	135
§ 3 晶体的面缺陷	151
第六章 塑性变形及变形后的金属在加热时组织与性能的变化	155
§ 1 单晶体金属的塑性变形	155
§ 2 多晶体金属的塑性变形的特点	166
§ 3 合金的塑性变形	169
§ 4 塑性变形对金属组织和性能的影响	173
§ 5 塑性变形后的金属在加热时其组织、性能的变化	180
§ 6 金属的热加工	193
第七章 铁碳合金	195
§ 1 铁碳合金中基本相及其性能	195
§ 2 铁碳相图(实为 $Fe-Fe_3C$ 相图)	196
§ 3 碳和杂质对钢的组织 and 性能的影响	202
§ 4 铸铁	204
第八章 合金的成分、组织及性能之间的关系以及如何为一定用途选择合金	207
§ 1 引言	207
§ 2 由单相固溶体构成的合金	208
§ 3 由两种以上晶体构成的复相合金	215
第九章 钢的热处理及合金钢常识	226
§ 1 钢的热处理目的及其涵义	226
§ 2 钢在加热时的转变	227
§ 3 钢在冷却时的转变	230
§ 4 钢的热处理方法	241
§ 5 合金元素在钢中的作用	261
§ 6 钢的分类及钢号表示方法	267

绪 言

国防建设和国民经济的各个部门，广泛地使用着金属，这是因为金属具有各种各样的性能能满足各个部门的要求之故。这些金属有的硬度很高，有的塑性很好；有的导电率很大，有的电阻很高；有些具有大的磁感和矫顽力，有些则实际上没有磁性；有些抗腐蚀性很高，有些则很快就被周围介质所腐蚀；有的熔点极高，有的熔点很低等等。

在机器制造、建筑和金属材料生产过程中，经常要遇到选材、创制新型材料、制定合理生产工艺和解决生产过程中出现一系列技术问题等。在这些过程中始终贯穿着多、快、好、省和少、慢、差、费的斗争。因此，从事生产和使用金属材料的有关人员，应以阶级斗争为纲，正确地运用有关金属材料的科学知识，为社会主义革命和建设服务。本课程的主要内容就是讨论有关金属和合金的一些基本规律，而材料生产的工艺和理论问题将在有关专业课中讨论。

第 一 章 金属的晶体结构和液态金属结晶

§ 1 固态金属的组织 and 结构

一、纯金属铸锭的宏观组织与显微组织

制成的金属制件的外观往往使人们对金属有一种不正确的概念，即认为它是在各个方向都具有相同性质的均匀物质，通俗地讲所谓“铁板一块”。

事实却不然，我们深入金属制件的内部，就可以发现作为金属的一个通性—晶体性。观察断口的形状乃是判断金属内部组织的一种最简易而又实际可行的方法。金属在破断以前如未发生塑性变形，则能清晰地观察到断口呈粒状，这些颗粒称为晶粒。如图 1—1 是从电弧熔炼的钛锭上锤击下来的碎块，其断口仍保持了晶粒的实际形状；如果在破断前金属发生了塑性变形，往往歪曲了晶粒的实际形状。如果观察某些铸锭的断口，可以看到金属铸锭是由大小和形状不同的各个晶粒组成的组织复杂的物体。那些晶粒有些是垂直于铸锭的表面彼此平行地一排排地向内伸长，有些则毫无秩序地向各个方向散乱地排列着。假如把铸锭切开，把切面磨光并用某种试剂浸蚀之，那么铸锭的组织会显得更清楚了。例如，在图 1—2 中可看到铜铸锭的组织。

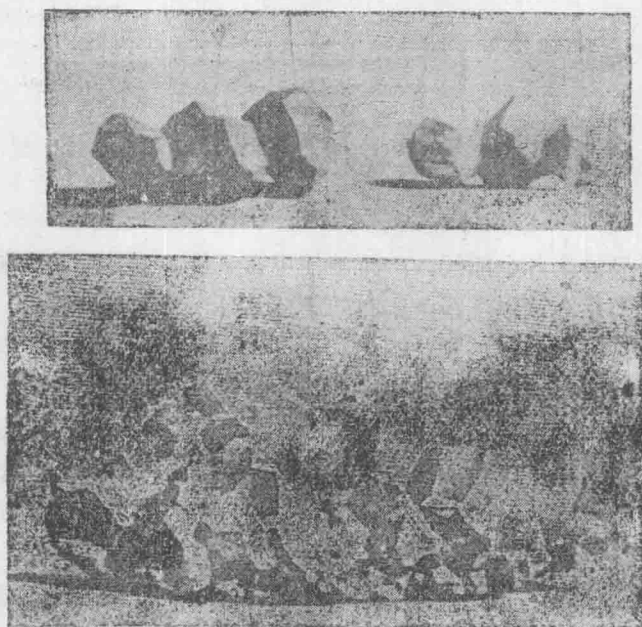


图 1—1 电弧熔炼的钛锭上所取的碎块

直接观察破断的断口的方法称断口分析。剖开后，磨光和浸蚀并用肉眼（或用低于50倍的放大镜）观察的方法称宏观分析（也称低倍分析）。

只简单地观察断口和低倍试样就可以迫使我们承认，工业用的金属和合金是由大量的晶粒所组成的，这种金属称为多晶体金属以资与特殊用途单晶体金属区别。

显然，利用断口和低倍分析可以观察金属晶粒大小，形状和不同晶粒彼此分布的情况。这种组成金属晶粒的大小、形状和分布的不同情况，称之为金属的组织。用肉眼或借助于放

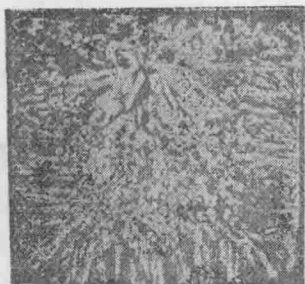


图 1—2 铜铸钛的宏观组织

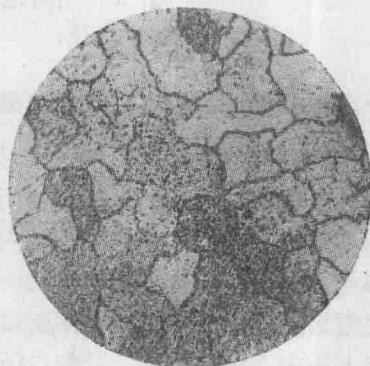


图 1—3 纯铝的显微组织

大镜（放大倍数低于50倍）观察到的组织称宏观（低倍）组织。宏观分析除了可以研究低倍组织外，尚可分析金属铸锭内部的缺陷：如气孔、疏松、裂缝和大块熔渣夹杂等。

试样经过相应的准备，借助于显微镜来观察分析，称为显微（高倍）分析。一般利用金

相显微镜可以把金属的组织放大 50—2000 倍左右，那末金属的组织将看得更要清晰和细微一些。观察到的组织称显微（高倍）组织。如图 1—3 为纯铝的显微组织，可见，纯铝是由多边形的晶粒组成，晶粒之间的交界称为晶界。

由金属铸锭或制件的不同部位取下的试样，其显微分析以及化学分析的结果常常是不相同的。铸锭和制件的组织化学成分不均匀，将导致性能上的不均匀。例如铸锭在表面和在内部，在上部和在下部的性能是不同的；轧制的板材沿轧制方向与其它方向的性能也有明显的差异。这样，肤浅地认识金属的组织性能，已足以使我们相信它是不均匀的了。

铸锭和制件是不均匀的、是由晶粒组成，那末晶粒内部是否均匀一致的呢？进一步观察就可以看到晶粒内部也是不均匀的，组织上的不均匀，如图 1—4 所示，称之为亚晶粒（或称亚结构、嵌镶块），它们之间的交界则称亚晶界。较大的亚晶粒可以在高倍的金相显微镜下观察到，微细的亚晶粒和更精细的组织，只能依赖更大鉴别能力的电子显微镜来观察，或者用 X 光结构分析的方法间接地测量。

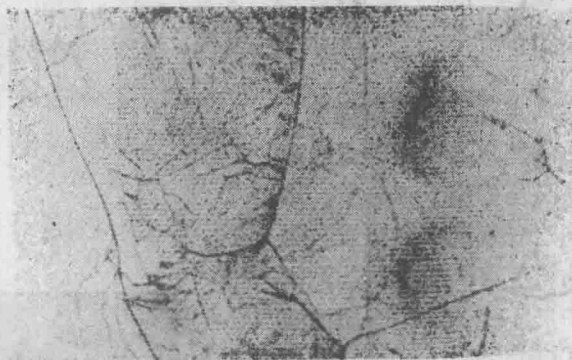


图 1—4 纯铝中的亚晶粒

金属内部组织是紧密地与金属的性能相联系的，通常在室温下，多晶体金属的晶粒和亚晶粒的尺寸减小，可在很大程度上提高金属的强度。

二、金属的晶体结构

1. 晶体的各向异性

工业上使用的金属一般都是呈固体状态的，固态金属和合金都是结晶物质。

结晶物质区别于非晶物质的主要特点是“各向异性”的。换言之，即在晶体的各个方向上性质是各不相同的。

结晶物质的各向异性在晶体成长的过程中就已经表现出来：晶体由小到大，由一颗晶核向各个方向成长获得单晶体，如果各方向的成长速度都相同的话，那末，应该成长个球体。而实际上，在成长条件允许的情况下，由于各方向的成长速度不同，单晶体往往成长规则的几何外形——立方体或棱柱体等。就象地质工作者在野外经常能采集到的各种形状的单晶体标本一样。

晶体在机械性能方面表现的各向异性，可用我们所熟悉的云母作为例子，晶体沿着某些特定的平面特别易于辟开（撕开），但却沿着另一些方向则很难拉断而辟开，这说明，结晶

物质都有其完全特定的辟开面。这是机械性能的各向异性的表征之一。

晶体的机械性能：如弹性模量，屈服极限，破断阻力等在各方向上都是不相同的。

现在，问题又产生了，为什么我们日常接触到的金属铸锭和铸件，却似乎没有这类特性呢？答案是工业用金属都为多晶体金属，就每个单独的晶粒来讲，相当于一个单晶体，具有各向异性，但各个晶粒在整块金属内的空间位向是任意的，各方向上强弱互相抵销和补充，因此，整块金属各方向上的性能是各晶粒性能的综合表现，所以，似乎又是均匀相同的，这称“伪各向同性”，即虽表现为各方向上性能相同，但这是掩盖了实际晶体的本质——各向异性。在特殊的情况下，如定向结晶的铸块、经强烈冷轧的或变形后退火的某些板材等，各晶粒的位向彼此趋于一致（顺向排列），以致虽为多晶体材料也表现出单晶体的各向异性。用具有各向异性的板材去深冲零件时，由于其机械性能的各向异性，深冲件各方向的延伸程度大不相同，本应平齐的杯口，却出现了“耳子”，如图 1—5 为深冲紫铜零件时，在筒形的上部出现四个耳朵（称“制耳”现象）。这是由于这些各向异性的板材，在垂直和平行轧制方向的延伸率很低（约 15%）；而与轧制方向成 45° 方向的延伸率很高（约 70%）。它正对应于出现耳子的方位。

2. 空间格子（空间点阵）与单位晶胞

现在，又产生另一问题，晶体为什么表现各向异性呢？这应该从晶体的原子（分子、离子）在空间呈规则排列这一客观事实出发，晶体中原子在空间排列的特征称为晶体结构，研究晶体结构牵涉到原子尺度的范围，金属的原子间距一般在 $3-4\text{\AA}$ (10^{-8}cm) 范围，目前，最有效的办法是 x 光结构分析方法。

金属原子在空间按一定规律堆积。我们可以假想通过各原子中心相应地联接成许多原子平面，这样，就可以把晶体中的原子（分子、

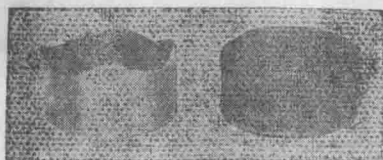


图 1—5 深冲零件的制耳

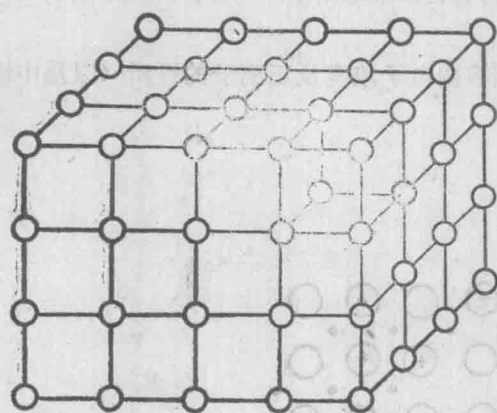
离子）想象是依着相互平行、距离相等的平面组而排列着，不同组的平面彼此以一定角度相交。这样，结晶物质中的全部原子（分子、离子）即形成所谓结晶格子又称空间格子或空间点阵（如图 1—6 (a)）。这样就把空间画分成许多平行六面体，这种六面体就是构成该空间格子的最小重复单位，称单位晶胞或简称晶胞，如图 1—6 (b)。晶胞的棱长称为该点阵的点阵常数（晶格常数），点阵常数的量度单位是 $\text{\AA}$ （埃）， $1\text{\AA}=10^{-8}\text{cm}$ ；或 kx （千依）， $1kx=1.00202\times 10^{-8}\text{cm}$ 。用 x 光结构分析的方法可以测定出各具体金属的点阵常数。

对称是标示空间格子类型的最重要的几何学性质。所有晶体物质的晶体结构，分属 7 个晶系。晶系的划分是以坐标轴的类型为根据的。借此可以最简单地描述出各种晶形。如果有对称轴与对称面的话，此时则以对称轴为坐标轴，以对称面做为坐标面。

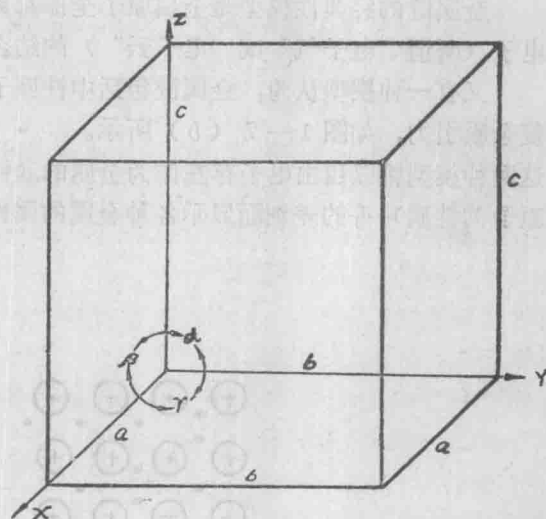
七大晶系十四种空间点阵，列于表 1—1。

3. 金属键和常用金属的晶体结构类型

金属原子间的结合，除了铍、铋、锗、镓等亚金属的结合键为共价键外，真正金属都具有金属键。



(a)



(b)

图 1—6 简单立方晶格 (a) 和晶胞 (b)

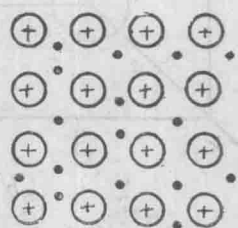
表 1—1

结 晶 系	空 间 点 阵	棱边长度与夹角关系
立方晶系	简单立方点阵 体心立方点阵 面心立方点阵	$a = b = c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
六方晶系	简单六方点阵	$a_1 = a_2 = a_3 \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
正交晶系	简单正交点阵 底心正交点阵 体心正交点阵 面心正交点阵	$a \neq b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
正方晶系	简单正方点阵 体心正方点阵	$a = b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
菱方晶系	简单菱方点阵	$a = b = c; \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
三斜晶系	简单三斜点阵	$a \neq b \neq c; \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
单斜晶系	简单单斜点阵 底心单斜点阵	$a \neq b \neq c; \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$

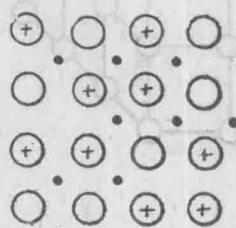
金属键的经典性模型是金属原子全部都离子化了的，也就是正离子与自由的共有化的价电子（所谓“电子气”或“电子云”）的结合，如图 1—7（a）所示。

又有一种模型认为：金属键包括中性原子间的共价键以及正离子和电子云间库仑引力的复杂吸引力，如图 1—7（b）所示。

这两种模型都以自由电子存在作为金属的通性，因自由电子浓度及正离子的性质（以及中性原子的性质）等的差别而显示各种金属的属性。



(a)



(b)

图 1—7 金属键模型

由于金属原子的这种结合方式，使金属具有一系列的特性：金属的自由电子在一定的电位差下就能作定向运动，这就表现为金属具有良好的导电性；它的导电性不仅比非金属大 10^{20} — 10^{30} 倍，而且金属的导电性与非金属相反，随温度的升高而降低，这是由于金属中离子振动的振幅随温度升高而增大，因而阻碍自由电子运动所致。当金属内原子面之间作相对位移时，正离子仍和自由电子保持着结合键，因此，金属具有较好的可塑性，自由电子的运动及正离子本身的振动实现了热的传导，离子（或原子）振动为所有物质所共有，而自由电子的运动却为金属所特有，因此，金属具有良好的导热性等等。

金属原子的这种结合方式决定了上述金属的特性。那末，这种结合方式与晶体结构又有什么联系呢？主要是由于金属原子之间的键力较强，并且不象共价键与离子键那样，周围毗邻原子的排列受键数的限制和有明显的方向性；如碳周围只能有四个毗邻原子共价。换言之，金属键没有饱和性和方向性，所以，在晶体中，原子的排列总是趋向于紧密的排列。

真正金属中，除了少数金属具有复杂的结构（如 γ -Cr、 α -U、 α -Mn 和 β -Mn）外，都具有简单的典型的金属结构。典型的金属结构为：面心立方点阵，体心立方点阵和密排六方结构。兹分述如下：

(1) 面心立方点阵

面心立方点阵的单位晶胞如图 1—8 所示。其实将原子作为硬球形状，那末点阵的原子实际堆积的情况如图 1—8（b）所示。

晶胞中每角上和面上都有一个原子。由于结晶点阵是由很多晶胞所组成，每晶胞中每角上的原子为 8 个相毗邻晶胞所共有；每晶胞的每面中心还有一个原子，面中心的原子为相邻

两个晶胞所共有。如图 1—8 (c) 所示。因此属于一个晶胞的原子数应为： $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$ 个。晶胞的棱边长度称为点阵常数，因为是立方体，只要一个点阵常数 a 表示之。注意：点阵常数并不是原子间最短距离。从图 1—8 (d) 就可以明显地看到，在面心立方点阵中在面的对角线方向上原子排列是最紧密的。一般把最邻近原子间距（原子中心之间的距离）定义为原子直径，则在面心立方点阵中原子半径 r 与点阵常数 a 的关系就很明瞭了。

$r = \frac{\sqrt{2}}{4} a$ 。如铝的点阵常数 $a = 4.041 \text{ \AA}$ ，而 $r = 1.43 \text{ \AA}$ 。

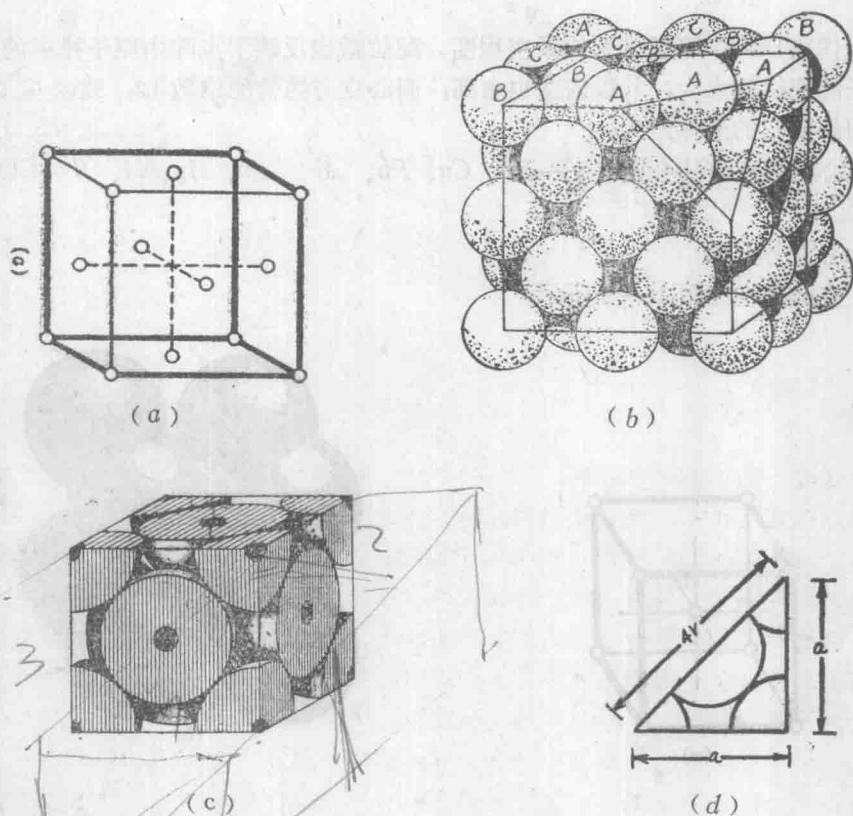


图 1—8 面心立方晶胞

点阵中和某一原子相邻的原子数目称为配位数。配位数常以某一原子最近邻的原子数为准；例如面心立方点阵中原子间距（更正确些是中心间距）最邻近者为 $\frac{a\sqrt{2}}{2}$ ，则点阵中任一原子周围均有以此距离而分布的12个邻接原子。为便于观察起见，如图 1—8 (c) 所示，选一角上原子为准，则在一个晶胞中相邻三个面中心的原子为其最邻近原子，每个角上原子周围有 8 个晶胞，故一原子最近邻的原子似乎应为 $3 \times 8 = 24$ ，而实际上每个面中心原子在分别相邻晶胞中重复计算了一次。故实际上最近邻的原子数为12，即面心立方点阵的配位数

为12。在另外一些类型的点阵中配位数也有将次邻近的原子计算在内，此时应分别标明。

晶胞内原子所占的体积和晶胞总体积之比称为点阵内原子的致密度或称致密系数 (K) 即：

$$K = \frac{\text{晶胞中原子所占体积}}{\text{晶胞体积}}$$

原子作为一个球体，知道了晶胞中的原子数目，以及原子半径和点阵常数的关系后，致密系数 (K) 是不难计算出来的，对面心立方点阵而言

$$K_{\text{面心}} = \frac{4 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{2}}{4} a \right)^3}{a^3}$$

致密度代表点阵中原子排列的紧密程度。配位数也反映了点阵中原子排列的紧密程度，点阵中原子的配位数愈大，其致密度也愈高，面心立方结构配位数 12，致密度 0.74 是原子在空间排列最紧密的晶体结构。

属于面心立方点阵的金属有 $\gamma\text{-Fe}$ 、 Cu 、 Pb 、 Al 、 Au 、 Ag 、 Ni 、 $\beta\text{-Co}$ 、 Pt 、 Pd 、 In 和 Rh 等。

(2) 体心立方点阵

体心立方的晶胞如图 1—9 所示。

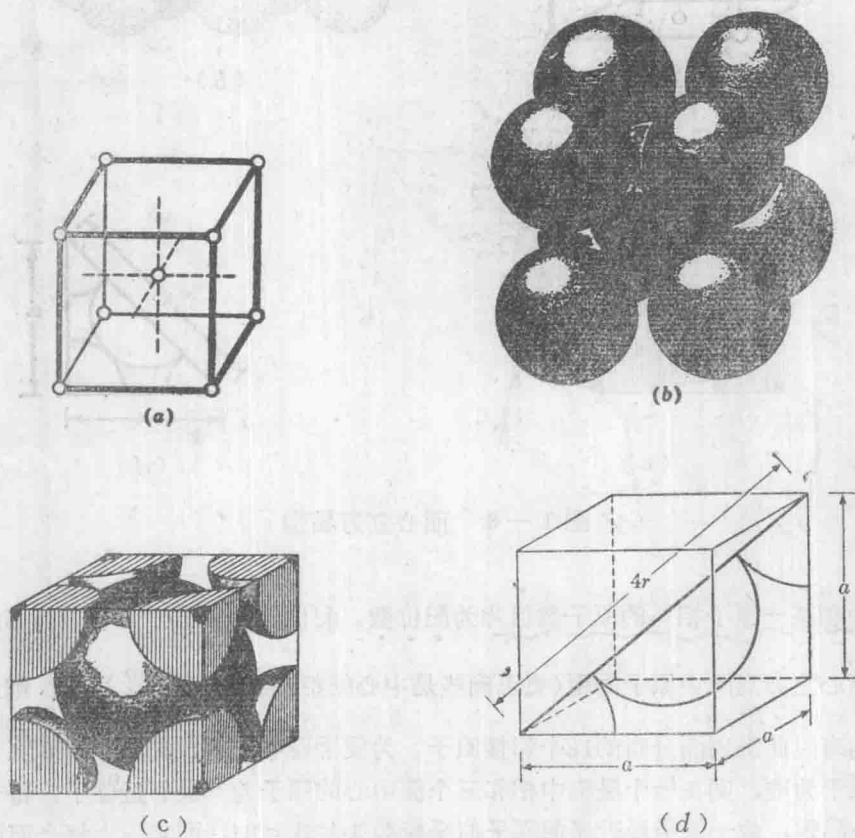


图 1—9 体心立方晶胞

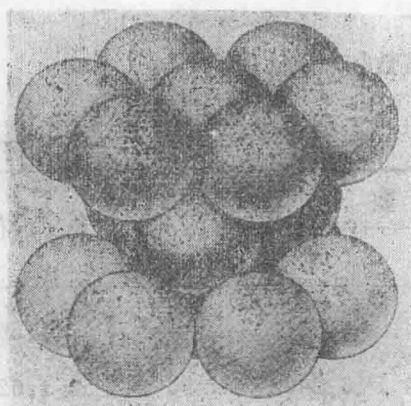
在晶胞中每角上有一个原子，在晶胞体中心有一个原子，原子排列最紧密的方向是体的对角线，比较各原子面清楚地知道，体对角面上原子排列最紧密。在体心立方点阵中：单位晶胞中的原子数为 $\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$ 个；最邻近原子间距（原子直径）为 $\frac{\sqrt{3}}{2} a$ ；配位数为8，有时把次邻近（距离为 a ）原子数计入，则配位数为 $8 + 6$ ；点阵中原子致密度为0.68。比较一下图 1—8 (c) 与 1—9 (c) 可以明显地见到体心立方点阵的原子排列的紧密程度不如面心立方点阵。

属于体心立方点阵的金属有： α -Fe、 δ -Fe、 α -Cr、Mo、W、V、Li 和 Na 等。

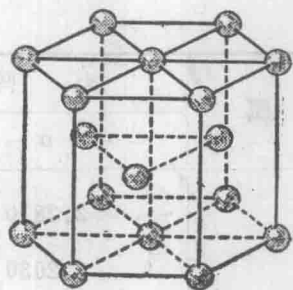
(3) 密排六方结构

密排六方结构的晶胞如图 1—10 所示，采取整个六方柱体作为单位晶胞，则在晶胞中，体内三个原子为晶胞所独有，底面中心的原子为 2 个晶胞所共有，角上的原子为左右上下 6 个晶胞所共有，因此每个晶胞的原子数为

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



(a)



(b)

图 1—10 密排六方结构的晶胞

密排六方结构应用二个点阵常数表示：六方面（底面）的边长 a 和两底面间的距离（高度） c 。

密排六方结构中原子堆积的方式如图 1—10 (b)，中间一层的三个原子，分别坐落在底面上棱边上二个原子与面中心一个原子组成的正三角形重心位置。其中间层原子与底面上相邻原子的距离，即晶胞中原子间距 (d) 为：

$$d = \sqrt{\frac{a^2}{3} + \frac{c^2}{4}}$$

真正的密排六方结构是：底面这三个原子最紧密靠近，第二层的原子也紧密地落在此三个原子形成的凹陷中（图 1—11），即组成一个正四面体，则 $d = a$ ，代入上式 $\frac{c}{a} = \sqrt{\frac{8}{3}} = 1.633$ ， $\frac{c}{a}$ 称为六方结构的轴比，即当 $\frac{c}{a}$ 轴比为 1.633 时，结构内原子是真正密集地排列

着的, 但一般六方结构的金属, 其 $\frac{c}{a}$ 值在 1.57~1.64 之间, 而锌和镉结构中 $\frac{c}{a}$ 值特别大如表 1—2。

不是最紧密排列时 $d \neq a$, 当 $d > a$ 时, d 就不是原子间最近距离了, 则 $\frac{c}{a} > 1.633$; 当 $d < a$, $\frac{c}{a} < 1.633$ 。

当 $d = a$ 时, 结构内原子的配位数为 12; 当 $d \neq a$ 时, 配位数为 6 + 6
密排六方结构的致密度为:

$$K_{\text{密排六方}} = \frac{6 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{a}{2}\right)^3}{3 \times a \times \frac{\sqrt{3}}{2} a \times c}$$

$$\frac{c}{a} = 1.633 \text{ 时}$$

$$K_{\text{密排六方}} = 0.74。$$

表 1—2 列出几种密排六方金属的点阵常数和 $\frac{c}{a}$ 轴比值。

表 1—2

金 属	点 阵 常 数 ($\text{\AA}$)		$\frac{c}{a}$ 值
	a	c	
Be	2.2810	3.5771	1.5682
Mg	3.2030	5.2002	1.62354
Ca	3.98	6.52	1.638
α -Tl	3.4496	5.5137	1.5984
α -Ti	2.9444	4.6737	1.5873
α -Co	2.502	4.061	1.623
Zn	2.6595	4.9368	1.8563
Cd	2.9731	5.6069	1.8858

(4) 面心立方与密排六方点阵的原子堆积方式。

密排六方结构和面心立方点阵配位数和致密度相同, 说明两者都是原子在空间最紧密的堆积。但它们原子堆积的方式不同, 如图 1—11 所示, 第一层原子 A 在“0”的位置, 组成最紧密的排列, 第二层原子 B, 本身亦组成最紧密的排列, 但各个原子分别坐落在第一层原子组成的“ $\triangle$ ”形凹陷中, 这样形成第一、第二层之间最紧密的靠近, 第三层原子 C 的堆积,

也必须紧靠第二层，才组成最紧密堆积的结构，现在分别有二种可能位置；(i) 是坐落在第二层“○”原子组成的“▽”凹陷中，相当于重复第一层的相对位置，用符号来表示，则堆积方式相当于 $ABABAB\cdots$ ，这就是密排六方结构（图 1—10 b），各层堆积的最紧密的原子面相当于密排六方的底面。(ii) 第三层原子坐落在第二层“○”原子组成的“△”凹陷中，这一位置既不与第一层重复更不重复于第二层，第四层原子中心才和第一层（A）相重复，因此它的堆积方式为 $ABCA\cdots$ ，这就是面心立方点阵，这种堆积方式组成面

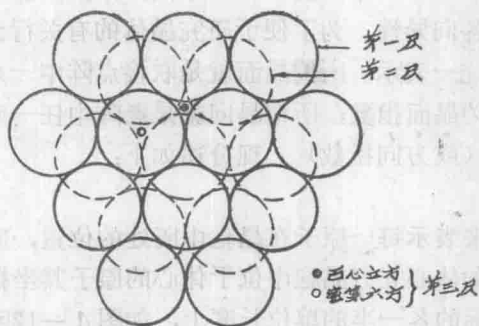


图 1—11 密排六方结构和面心立方点阵原子堆积方式的比较

心立方点阵不易直观看清楚，因为它堆积的最紧密排列的原子面不是面心立方点阵的底面，而是以面心立方点阵的(111)面（晶面符号将在下节讨论）按 $ABCA\cdots$ 堆积的，从图 1—8 (b) 可以清楚地看出堆积方式和晶体结构特征之间的联系。

体心立方点阵就不如这两种结构原子排列得那么紧密。

(5) 晶体结构的多型性

有一些金属如铁、钛、锡、钴、锰等可以在不同条件下以不同的晶体结构排列，同一金属在一定条件下（温度、压力）可以由一种晶型转变为另一种晶型，称为多型性（同素异晶）转变。例如铁，高温时为 γFe （面心立方）在冷却至 910° 转变为 αFe （体心立方），这时由于致密度的不同，转变时将发生体积膨胀。这一点对钢的热处理而言，具有非常重要的意义。又如普通白锡（ $\beta-Sn$ ）具有正方格子，而当低于 $+18^\circ C$ 时转变为金刚石型结构的灰锡（ $\alpha-Sn$ ），体积将发生竟达25%的膨胀，这时锡制品或锡锭表面出现灰色的小疙瘩或者斑点，实际上这些地方变成了灰色的粉末，这就是所谓“锡疫”。近代，人造金刚石就是利用高温、高压迫使六方结构的碳（普通石墨）转变为金刚石型的立方结构（金刚石）。

最后把有关原子半径的问题补充说明一下：很早以前认为每一种元素的原子都具有它固有的尺寸，由此而产生原子半径的概念，实际上原子半径是一个可变的数值，它首先决定于键合的方式，譬如由不同电荷的离子结合而成的离子键，其最近邻的原子间距已经不是原子而是由离子大小来决定。显然，离子半径比原子半径为小，所以金属钠中，钠的原子半径为 $1.86 \text{ \AA}$ ，而在 Na 的卤化物中 Na 的原子（实为离子）半径只有 $0.98 \text{ \AA}$ 。

除了键合方式对原子间距有影响外，晶型的配位数对原子间距也有影响，业已证实，原子半径随配位数的增加而增大，所以有些金属发生多型性转变时，因为不同晶型的配位数不同，其原子半径也相应有所变化。

原子半径是晶体结构中的一个重要参数，因为合金的相结构与异类原子间的相对大小有

密切关系，这将在第三章讨论。

三、原子坐标、晶面指数及晶向指数

在研究晶体的某些行为时，如异类原子进入金属点阵的相对位置，晶体的不同部分相对的位移等等，这时要说明原子在晶胞中的位置，以及晶体相对于那个原子面朝哪个方向作相对位移等等。事实上，我们在前面已经提及，同一晶体中不同的原子面或不同方向上原子排列方式和密度是不同的，原子间结合力大小也不同，因此，在不同晶面和晶向上会显示不同的性质，这就是晶体的各向异性。为了便于研究晶体的有关行为。表达不同的晶面和晶向，有必要用一定的符号来统一表示。所谓晶面就是联接点阵中一系列原子中心而组成的原子平面，表示晶面的符号称为晶面指数；所谓晶向就是点阵中任一原子列所表示的方向，表示晶向的符号称为晶向指数（或方向指数）。现分述如下：

1. 原子坐标

用原子中心的坐标来表示每一原子在晶胞中所处的位置，原子坐标是用晶胞轴长为座标单位，以数字表示。例如体心立方晶胞中位于体心的原子其坐标为 $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$ ，表示该原子处在以 x 、 y 、 z 轴为坐标的各一半的单位长度上，如图 1—12 所示。同样，面心立方晶胞中 xy 面中心的原子以 $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0$ 表示其所处的位置，如图 1—13 所示。

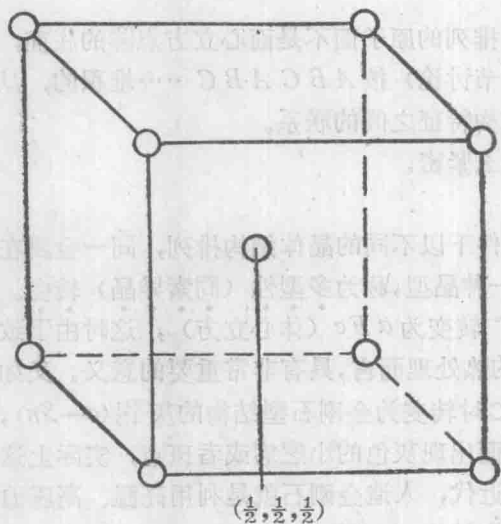


图 1—12 体心原子的坐标

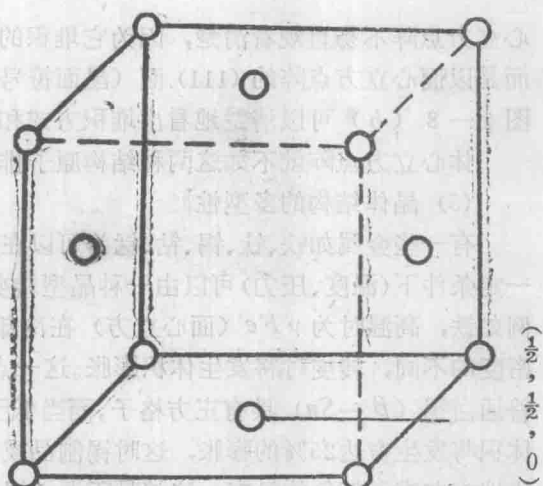


图 1—13 面心原子的坐标

2. 晶面指数

晶面指数可按下列步骤确定：

(1) 在点阵中设置参考坐标轴（常为晶胞的各棱），坐标原点应位于待定的晶面以外，以免出现零截距。

(2) 以晶胞各棱边的长度为度量单位，求出待确定晶面在各轴上的截距。如图 1—14 所示。晶面在 x 轴上 2 个 a 长，故截距为 2；在 y 轴上截了 3 个 b 长，截距为 3；在 z 轴上截一个 c 长，截距为 1。这样就得到该晶面在 x 、 y 、 z 三轴上之截距顺序为 2，3，1。假如该晶面与某轴平行，则其截距为 ∞ ，表示在无穷远处相交。

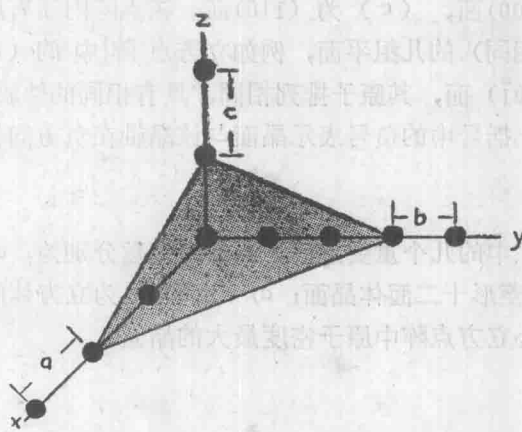


图 1—14 晶面与各轴的截距

(3) 取各截距的倒数，按上图所得截距的倒数为 $\frac{1}{a}$, $\frac{1}{b}$, $\frac{1}{c}$ 。

(4) 将上述三个倒数化简成最小整数，并写入括号 () 内，如上例为 (3, 2, 6)，此即为所求的晶面指数，它代表性质相同的一组互相平行的晶面。

图 1—15 (a) 画出的 (111) 面即代表在空间一组互相平行的晶面，同理。图 1—15

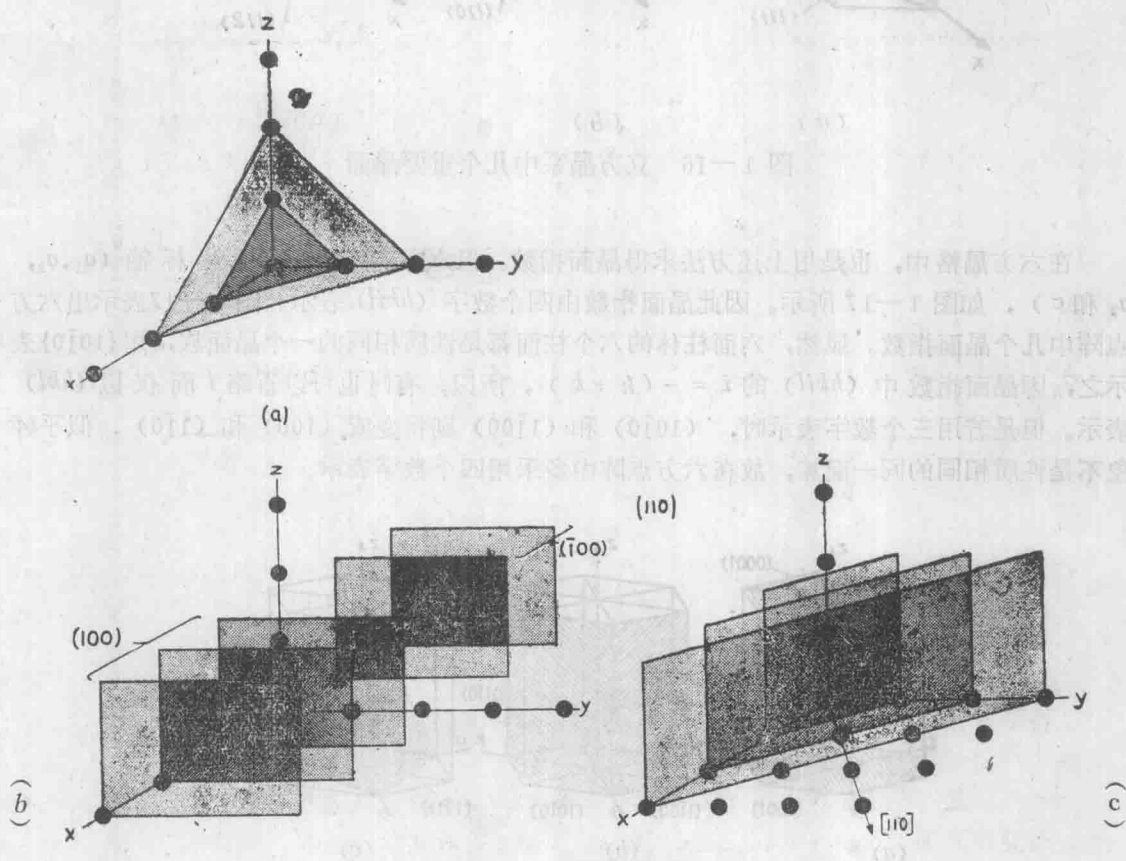


图 1—15 立方晶系的某些晶面指数