

金屬學

再版序言

从本書初版出版以来，已逾一年，在这大跃进的一年之間，我国工业和农业获得巨大的进展；在党的教育方針的正确指导下，我国文化教育事业也得到空前的发展和伟大的成就。所有这些情况都使我們感到原書內容不足，不能适应新的形势的需要。为貫徹党的教育方針，及时反映我国工业实际，并根据原書在使用过程中发现的問題和新的教学大綱的要求，将原書作了如下的修改。

重新編写了金屬的机械性能試驗，鋼热处理的种类，合金鋼和鑄鉄各章；并对其它章节內容，如金屬的晶体构造，合金系，物理分析法，金屬的再結晶，鋼热处理理論基础，滲氮和碳素鋼等，作了修改和补充。內容的变化是增加了实际資料和某些数据，減少了和基础課重复及与专业需要相距过远的內容，并对某些实际問題作比較深入的理論分析，同时对原書存在的一些錯誤也进行了修正，使之更符合冶金专业学校需要和学生水平。

这次修改工作由北京冶金专科学校曹万正和李惠忠負責。本書仍保留了詹方海同志所写的第九章的第一二节和第十二章內容。本書的其它章节除第四章第三节和第十一章由曹万正編写外，其余章节均由李惠忠編写。

这次修改工作是在担任教学任务和参加教育改革的情况下进行的，時間紧迫，并由于編者知識有限，再版本中可能还有缺点和不足之处，我們竭诚希望使用本書的同志提出指正和批評，以便进一步提高本書的質量。

值此我們伟大党的生日前夕和国庆十周年之际，仅以此书作为献礼。

曹万正、李惠忠 于北京冶金专科学校 1959.6.30.

第一版序言

自中等专业学校炼铁、炼钢、轧钢、电爐炼钢等专业开设“金属学”这门课程以来，尚无一本结合我国实际情况和适合我国中等专业学校学生水平的金属学教材，这就给教师讲课和学生学习造成一定的困难。

本教材是在冶金工业部工业教育司的领导下，根据四年制炼钢专业“金属学教学大纲草案”编写的，在编写过程中也同时考虑了四年制炼铁、轧钢、电爐炼钢等专业的要求。今提出下列几点供使用时之参考。

1. 以下内容对轧钢专业可不必讲授：第二章第二节（相律及其应用，包晶反应平衡图）；第三章（钢的初次结晶——包晶反应部分）；第五章（金属的塑性变形及再结晶）。

2. 凡用小号铅字排印的部分，除第七章第四节（表面淬火）为轧钢专业应讲授外，其余可作补充教材之用。

3. 第十章第五节（合金钢的种类）对炼铁、炼钢专业讲授时，可作适当精简。

在编写时，北京钢校金工教研组陈松青、曹万正、王庭楷等同志曾热心参与本教材编写提纲的讨论，以及鞍山二钢校、武昌钢校、太原工业学校、本溪钢校、上海冶金机械等校金工教研组同志亦提出不少宝贵意见，特在此一併致以衷心的谢意。

本书第四章（第四节）、第九章、第十章、第十二章由詹方海编写，其余各章及绪论由李惠忠编写。由于编者为学识所限，加之教学经验不足，缺点和错误在所难免，有待同志们的指正，以便再版时一併修正。

——編 者

一九五八年五月

緒 論

金屬學是研究金屬和合金的成分、內部構造（結構）、性能以及它們之間相互關係的一門科學。

對純金屬而言，金屬的性能首先與各個元素的本性有關。例如，純銅比純鐵具有高的導電、導熱率和良好的塑性，但卻具有較純鐵為低的強度和硬度。

至於合金的性能就與其中各元素的含量即合金的組成密切有關了。例如，含碳量為 0.3% 的鐵碳合金（鋼）可以承受壓力加工，使其變形而不破裂，因而可採用鍛造方法來制成零件；但含碳量為 3.0% 的鐵碳合金（生鐵）不能承受任何壓力加工以改變其形狀，而只能採用鑄造方法來制成零件。顯然，鐵碳合金成分變化與合金內部結構的改變有密切聯繫，由於結構不同在性能方面就有很大的差別。

然而，合金的結構和性能不僅取決於合金的化學成分，還取決於合金的熱處理工藝條件。例如含碳量均為 0.8% 的兩塊鐵碳合金：一塊經加熱到 770°C 在爐內緩慢冷卻（退火）後，具有較低的硬度和強度，另一塊經加熱到同一溫度而在水中急冷（淬火）後，硬度和強度就較前者提高三四倍，這一性能的差別使前者可用做被切削物件，而後者可用來製造切削工具。

又如，在同一爐中熔煉出來的液態合金（生鐵），在兩種不同的條件下進行澆注：一為不加入任何物質而直接注入模中，另一為加入極其微量的合金元素（鎂、硅）後再注模中，結果就得到性能很不相同的兩種鑄件，前者強度低，性質脆；後者強度高且脆性小。

再如，同一成分的合金經不同程度的冷加工則得到性能不同的制件，冷加工程度大者，制件的硬脆性高；冷加工程度小者，則硬脆性小。

所有这些热、冷加工条件的变更而引起金属性能的变化是与金属内部结构的改变密切相关的。因此，金属和合金的性能就不仅取决于它们的化学成分，而在很大程度上还取决于它们的结构。

金属学就是一門研究金属和合金的成分、性能、结构和它們之間相互关系的科学；是研究用改变其化学成分，或用机械、热处理及其他方法来改善金属材料性能的科学。

由此可見，金属学是与許多科学和工艺知識密切联系的，例如冶炼、鑄工、金属压力加工、焊接、金属切削等。这些工艺課程每天都向金属学提出許多新的問題，同时也給金属学提供了丰富的經驗資料。金属学从各工艺課程中吸取資料，使其本身得到充实和发展；同时金属学也向各种工艺課程提供出科学的研究成果和新的技术材料，以促进它們的发展。

金属学是冶金和机械制造各专业的必修課程。無論該专业的毕业生是設計工作者或工艺工作者，在他們生产金属，选用金属材料，設計金属制件，对金属进行加工等工作中，都要經常不断地提高金属产品质量，正确地對金属进行加工和合理地选用金属材料，因此必须具备金属学这一知識。这样說来，学习金属学的目的就不仅在于掌握金属和合金的成分、性能和结构之間变化的規律知識，更为重要的是在掌握这一知識的基础上，正确地制訂和改进金属及合金的生产和加工工艺規程，以提高产品的质量 and 产量，降低废品率，合理地选择和使用金属材料，以充分發揮材料能力，延长其使用寿命，并降低成本。

我国不仅是冶炼金属和合金最早的国家，并且在很早以前就已掌握金属和合金的性能与成分之間的規律。

根据历史資料（周礼工考記、考工記等）記載和对发掘的銅器进行分析，証明远在三千多年前，中国在殷代和商代就能将冶炼出来的純銅和純錫，按照不同的目的，配制它們的合金。譬如为提高兵器的硬度，創造了合錫量較高的錫青銅，而創造鐘及

鼎用的合金則含錫量較少；为了节省錫料而創造鉛錫青銅以制成生活用具，如針、錐、裝飾用品等。

在两千多年前的“呂氏春秋”这一著作中，記載了古代对于銅錫合金性質的研究結論，这一結論是同現代金屬学的原理相符合的。

宋沈括在距今八百多年前，在其所著“夢溪筆談”的著作中記載了古代人民对鋼和鉄性質的了解和正确的应用。譬如为使劍刃鋒利而劍身柔韌，則劍刃宜用鋼制，而劍身宜用柔鉄。

在十四世紀明朝曹昭所著的“格古要論”（1388）一書之金鉄論中，記載了检查金、銀、銅、鉄及其合金的綜合方法，其中以粗視分析法为主。該書提供了通过粗視結構的觀察和分析以判斷金、銀及其合金的質量；同时为了考查金和鋼鉄的質量，还利用了不同的浸蝕剂。

这一著作總結性地記載了长时期来，我国古代人民考查金屬方法的成就。并且对制备金屬粗視試面的整个过程完全与現代金屬中检查金屬粗視試面的过程相符合。截至目前为止的国际史料而論，可以說明金屬的粗視分析法是我国古代劳动人民首先应用的。

我国古代在金屬热处理方面也有許多輝煌的成就。在东汉班固所著“漢書”中王褒传上說：“清水焯其鋒”：这就說明远在汉朝就能用热处理方法使刀劍更为坚硬和鋒利。

在明朝宋应星所著的“天工开物”（1637）一書中总结了我国古代在鋼鉄热处理方面所积累的成就。該書首先說明热处理的作用，并指出为了提高鋼鉄的强度和硬度，只有通过热处理来达到，否則弱性仍存；其次該書对各种工具和农具（如鎚、鉋、鋸、斧、鋤等）的热处理方法及效果加以詳細說明。这些記載都是合乎近代热处理原理的，而時間却是在距今三百多年前。

必須指出，所有上述文獻記載中的成就都是在民間应用已很普遍，流传已經久远，才經个别有志之士編写成文，載入史册。

然而，由于我国长期处于封建制度的束缚下，我国古代劳动人民所取得的科学技术上的光辉成就就未能得到系统的整理和充分的发展。

自十九世纪末叶以来，金属学之所以成为一门新兴的独立的科学，并在目前取得很大的成就，是与俄国学者和苏联科学家们的工作分不开的。其中 Л. К. 契尔诺夫是金属学的奠基人，他首先用肉眼发现钢的临界点，即当钢加热到一定程度时钢的状态发生转变，确定了这一转变对钢结构和性能的影响，并建立了第一个不同含碳量铁合金的热处理转变状态图；他还创造了科学的金属结晶理论，并解说铸锭的构造。苏联的化学家 H. C. 庫尔纳可夫创立了物理—化学分析法，并首先用此法来确定合金的成分、结构与性能之间的关系。苏联的其他科学家们，如 C. C. 斯捷因别格、A. A. 包奇瓦尔、Г. B. 庫尔久莫夫等人，他们在发展金属学理论和解决金属学中最重要和最复杂的问题上作出了卓越的贡献，并培养了許多年青一代的金属学家。

我国解放后設立了从事近代金属学的专门科学研究所，在冶金工厂和金属加工工厂中建立了金属学試驗室，在高等工业学校中也設立了許多用现代技术装备起来的金属学实验室，这对发展我国金属学，解决金属生产中的问题，以及为培养年青一代的科学家们无疑地起了极为重要的作用。

当代铸造事业中最大成就之一的球墨铸铁的制造和应用，在我国金属学工作者和生产部門密切的配合下，所取得的成就可列于世界先进科学水平的行列。

为了充分利用我国矿产资源，节约我国稀有而贵重的合金元素，金属学者們在寻求和創造新型合金方面也取得一定的成就，已建立我国自己的合金钢系统，并已研究成功多种达到国际水平的合金钢。

金属学是由下面五大部分所组成的：

1. 金属的结晶构造：研究各种金属的晶体构造及其特点，

金屬由液态轉变为固态的結晶过程和影响这一过程的因素来理解鑄造金屬的构造，以及在固态下当溫度改变时金屬內部結構所发生的变化。

2. 合金系：研究合金的构造，合金在不同溫度时所处的状态，以及合金的成分，結構和性能之間的关系。

3. 金屬和合金的研究和試驗方法：研究和分析金屬的結構和缺陷，以及試驗和測定金屬的性能。

4. 鋼的热处理：研究鋼在加热和冷却时結構和性能变化的規律，以及为获得一定性能的鋼所需的方法。

5. 金屬材料：研究各种成分合金（碳素鋼，合金鋼，鑄鉄，有色金屬和粉末合金）的結構，热处理、性能以及它們的用途。

第一章 金屬的結晶構造

第一節 金屬的晶体構造

I. 晶体与非晶体

一切固态的物質都是由許多极其微小的質点——原子（或分子、离子）所組成。在固体状态下，根据原子在空間排列的方式，可将固态物質分为晶体与非晶体。

所謂晶体，就是原子按一定次序作有規排列的物体。相反，原子作无次序而紊乱状态存在的物体，称为非晶体。

物質內部的原子是否按一定次序排列，是利用 x 射綫分析法进行測定的。

晶体与非晶体的区别不仅表現在內部結構上，还表現在許多性能（物理、机械及其它）方面。显然，性能上的差别与內部結構是密切联系着的。

非晶体物質（如松香、树胶、石蜡、玻璃等）沒有固定的熔点，当升高温度时，凝結較牢固的非晶体物質就逐漸轉变为有显著流动性的液体。当冷却时，液体逐漸稠化，变成固态。由此可見，非晶体實質上就是一种粘度很大的液体。此外，非晶体的性能并不随方向而改变，因为在各个方向上，原子聚合的密度大致相同，这就表现出各向同性，或称为无向性。

晶体有固定的熔点。当温度升高时，晶体轉变为液体是在温度不变的情况下进行的。此外，由于晶体在不同的方向上，原子排列的密度不同，因而就表现出晶体的性能（机械的、物理的、化学的、）随方向而异，即表现为晶体的異向性。

所有固态的金屬和合金都是晶体。图 1 和图 2 表示在显微镜下看到的金屬晶体構造（在这里不能看出原子在晶体內排列的次序）。

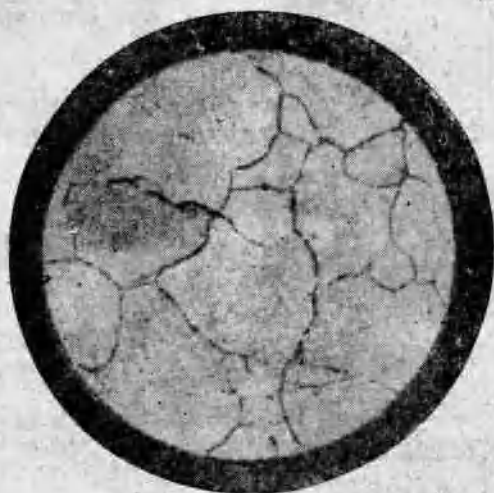


图 1 純銅的显微結構 ($\times 200$)

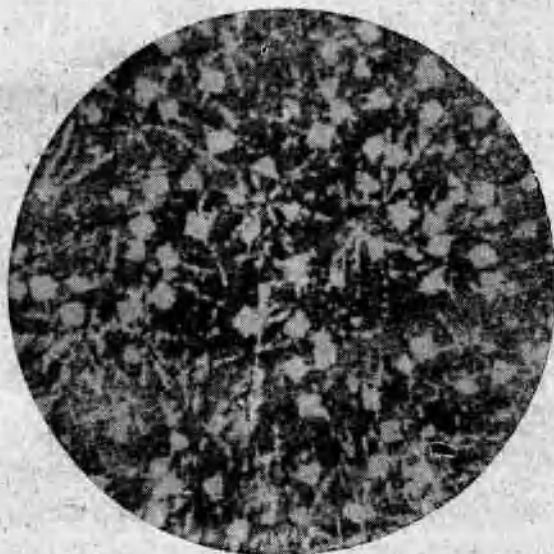


图 2 錫、銅合金的显微結構 ($\times 200$)

晶体是由許多原子有規則排列成的所謂結晶格子（或叫空間晶格）所組成。空間晶格如图 3 所示。在空間晶格中，由許多平

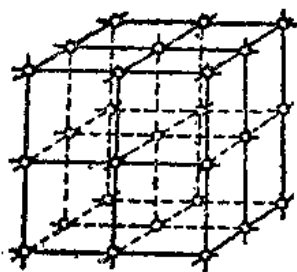


图 3 空間晶格

面在各行列上的相交点，称为晶格結点。晶体内部的原子（分子、离子）重心就是在这些結点上。

什么力量使金屬原子牢固地联結在晶格結点上呢？位于晶格結点上的原子相互之間会产生什么作用呢？如

果晶格結点上的原子离开它們原来的位置，以致使原子排列不規則化，这将使金屬处于怎样的能量状态呢？

I. 金屬的結合和表面能的概念

根据金屬的原子构造，在金屬原子結構中的最外层电子是价电子（或称自由电子），其数目較小，它們与原子核的結合力很弱，很容易脱离金屬原子，在金屬内部，即正离子的間隙处作自由运动，构成所謂“电子气”。电子气中的任一电子不是属于某一个原子，而是属于整个金屬中的正离子。因此，可以将金屬看作一个大分子，它是由带正电荷的离子与电子气构成的，如图 4 所示。金屬原子間的結合就是由于带电荷的正离子与电子气之間的相互作用力而引起的。

但是，必須指出，在晶格內各結点上的原子（严格地說，应为正离子，为便于称呼，晶格上的质点仍然当作原子）之間必須保持一定的距离 r_0 。如果原子之間的距离小于 r_0 时，則原子之間的同号电性（电子与电子，正离子与正离子）产生排斥力；如果原子之間的距离大于 r_0 时，則原子之間的異号电性（电子气与正离子）产生吸引力。所以，必然在某一距离 r_0 使原子之間的排斥力等于吸引力，則各原子处于稳定位置。

但是在物理学的概念中，物質状态的变化（如熔化、蒸发、升华、溶解、凝固、运动、静止等）常常用能量（其单位为千卡或尔格）的变化来表示，而不采用力（其单位为公斤或达因）的大小。所以在研究原子之間的距离变更时，与其采用它們之間作用力的变化，倒不如采用它們之間相互作用能的变化。如图 5 所

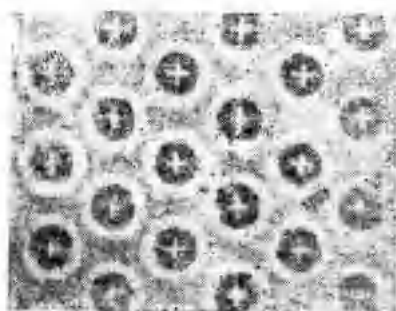


图 4 金屬结构示意图
在晶格結点上为正离子；在晶格結
点間隙处为自由电子

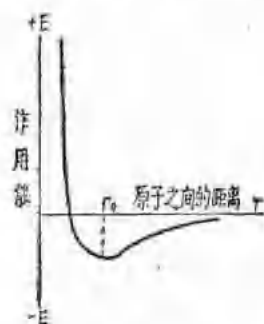


图 5 双原子之間的距离与
作用能的关系

示的双原子模型中，在相当于 r_0 的位置上，原子之間的相互作用能为最低。稍許改变它們之間的距离，都将引起它們之間作用能（排斥能或吸引能）的增加。因而相当于 r_0 位置处的原子处于最为稳定的位置，即处于平衡状态；而偏离 r_0 位置的原子，都将处于高能位的位置，即处于不稳定的状态。

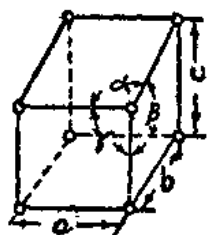
由上述最简单的双原子固体模型推广到大量原子結合的固体金屬时，可以看到，为使物体本身的总能量为最小，則物体內部的原子之間必然保持一定的距离，并有規律重复地排列成空間晶格。晶格結点上的原子处于“能谷”的位置（图 5），即处于稳定状态。但是，必須指出，原子在稳定位置不是作静止不动的，而是圍繞着平衡位置作高頻率的振动——热振动。这一运动的形式与晶体的热膨胀性和比热等現象密切相关。

然而在晶体表面上的原子，它們之間的作用力就不象晶体內

部的原子受力那样均衡了，因为在表面处的原子缺乏来自其上的作用力，这就使处于表面的原子，必须为克服内层原子对它吸引人内而作功（即相当于举高物体，必须为克服地面的引力而作功）。这部分功用来增加表面原子的能量（相当于克服地面所作的功用来增加物体的位能），即所谓表面自由能，简称为表面能。所以晶体表面的原子具有较高的能量，并处于不稳定状态。在后面将会看到，这一特性决定了晶界的行为。

II. 金属晶格的主要类型及其特征

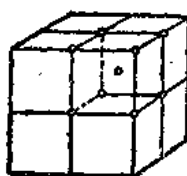
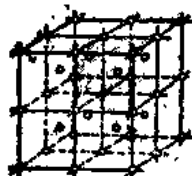
为了便于研究原子在空间晶格上排列的特征，从晶格上取下一个单位晶格，或称晶胞，如图6所示。如果这个单位晶格的各棱边长度相等，且相互垂直（ $a=b=c$ ， $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ ），则叫做简单立方晶格。



金属的晶格远比简单立方晶格复杂，最常见的有下面三种晶格类型：

1. 体心立方晶格 它的特征是

图6 单位立方晶格—晶胞 在立方晶格的各结点上和立方体的中



b

c

图 7

a—体心立方晶格；b和c—体心立方晶胞

心处各有一原子，如图7，a、b、c所示。属于这一类型的有：铬、钒、钼、钨、 α 铁（当温度在 910°C 以下以及 $1390\sim 1535^\circ\text{C}$ 之间）等。

2. 面心立方晶格 它的特征是在立方晶格的各结点上，以及立方体的各个面中心处各有一个原子，如图 8, a、b、c 所示。属于这一类型的有：铝、铜、镍、金、银、 γ 铁（当温度在910~1390°C时）等。

3. 密集六方晶格 它的特征是一个六方柱体，除去上下两面的各结点上及其面中心处各有一原子外，在六方柱体中心处还有三个原子，如图 9, a 所示。属于这种类型的有：锌、镁、镉、 α 钴、 β 钴等。

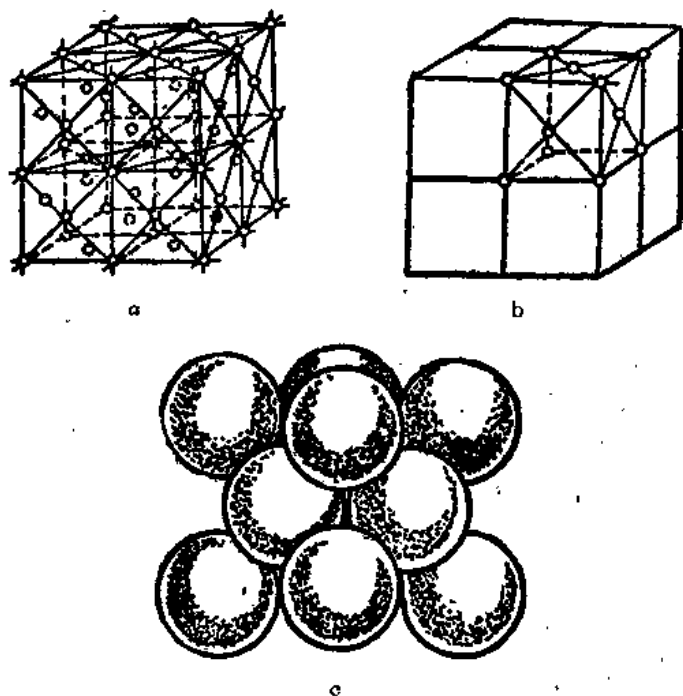


图 8

a—面心立方晶格；b和c—面心立方晶胞

还有一些为数不多的金属，它们的晶格有的是正方晶格（立方晶格的某一边较其它二边长些），如图 9, b 所示；有的是斜方晶格（三晶轴互相垂直而不等长）。

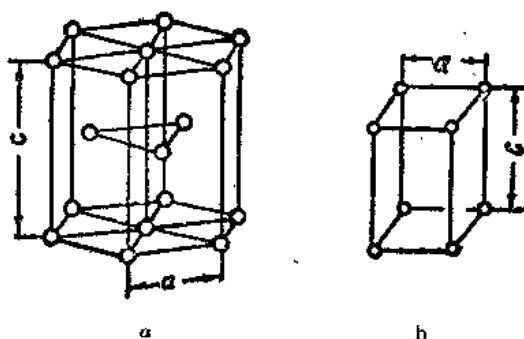


图 9

a—密集六方晶格； b—正方晶格

表 1 是形式稍加改变的門德雷也夫元素周期表。各种元素的晶格类型均在表中载明。

表 1

門得雷也夫元素周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	1 H 	元素的結晶構造 ☐ 面心立方晶格 ☐ 体心立方晶格 ☒ 金刚石型立方晶格 ☐ 六方晶格 ☐ 正方晶格 ☐ 斜方晶格																	
2	2 Li 												4 Be 	5 B 	6 C 	7 N 	8 O 	9 F 	10 Ne 
3	3 Na 												12 Mg 	13 Al 	14 Si 	15 P 	16 S 	17 Cl 	18 Ar 
4	4 K 												20 Ca 	21 Sc 	22 Ti 	23 V 	24 Cr 	25 Mn 	26 Fe 
5	5 Rb 												28 Ni 	29 Cu 	30 Zn 	31 Ga 	32 Ge 	33 As 	34 Se 
6	6 Cs 												36 Kr 	37 Rb 	38 Sr 	39 Y 	40 Zr 	41 Nb 	42 Mo 
7	7 Fr 												54 Xe 	55 Cs 	56 Ba 	57 La 	58 Ce 	59 Pr 	60 Nd 

晶格的大小是用晶格常数来表示的。立方晶格的大小用一个常数 a 来表示 (图 6)，六方晶格和正方晶格的大小用两个常数来表示，即 a 和 c ，或 c/a (图 9, a 、 b)。

原子的大小和晶格常数都是用一种特别的单位来计量的，这种单位叫做埃 ($\text{\AA}$)； $1 \text{\AA} = 10^{-8}$ 厘米。

在金属晶体中立方晶格的常数 a 为 $2.5 \sim 5.5 \text{\AA}$ 。由此可见，晶格在大小上的差别是有限的。在上述周期表中，凡同属一组且具有同一类型晶格的诸元素，其原子序数愈大者，晶格常数也愈大。

下面将讨论与单位晶格密切相关的几个特性，这些特性对認識金属的各种性质 (密度、溶解度、晶格转变时体积的变化等) 是极其重要的。

1) 原子数 即单位晶格所具有的原子数目。

在体心立方晶格中，初看来似乎拥有 9 个原子，但是考虑到晶格上的各结点在空间晶格所处的位置时，就可看出：处在立方体每一顶点上的原子同时属于 8 个晶胞所共有，因此一个晶胞仅占有 $\frac{1}{8}$ 个原子，类似这样顶点位置的数目共有 8 个，所以每一晶胞只平均到 $\frac{1}{8} \times 8 = 1$ 个原子；而处于立方体中心的原子仅为一个晶胞所有。因此，体心立方晶格的每一晶胞只有两个原子 ($\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$)。

在面心立方晶格中，立方体顶点上的原子数的计算与上面相同，即 $\frac{1}{8} \times 8 = 1$ ；晶胞每个面中心的原子为两个相邻晶胞所共有，所以每个晶胞仅占有 $\frac{1}{2}$ 个原子，而立方晶胞共有六个面，于是每个晶胞占有 $\frac{1}{2} \times 6 = 3$ 个原子。因此，面心立方晶格中的每一晶胞应有 4 个原子 ($\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$)。

同理，也可求得密集六方晶胞共有 6 个原子 ($-\frac{1}{6} \times 12 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6$)。其中六方柱体每一顶点上的原子同时属于 6 个晶胞所共有，这样顶点的数目共有 12 个；六方柱体的两底面中心处的原子为两个晶胞所共有；六方柱体内的三个原子则完全为该晶胞所独有。

2) 邻接数 隣接数 (或称配位数) 用来表示晶格的紧密程度。晶格的紧密程度在很大程度上决定了金属的性质。

隣接数就是距任一原子等距离且最隣近的原子数目。

隣接数增大，则晶格紧密程度也随之增加。

很容易看出，距离体心立方晶格中任一原子相等且最隣近的原子数目为 8，所以体心立方晶格的隣接数为 8 (K 8)。面心立方晶格和密集六方晶格的隣接数各为 12 (K 12, F 12) 它们是原子在空间作最紧密的排列。

3) 晶格致密度 单位晶格中原子所占体积与单位晶格体积之比称为晶格致密度。

运用晶格的几何图形，以及简单的数学计算，就可求出各种单位晶格的致密度。体心立方晶格的致密度仅为 68%^①，而在面心晶格和密集六方晶格中，晶格致密度各为 74%。

由此看出，晶格的隣接数愈大，则原子本身所占的地方就愈大；晶格中的空隙就愈少。

① 今以体心立方晶格为例，求其晶格致密度 (将原子看成圆球，且紧密地排列在晶格上)。

设： η —晶格致密度； α —晶格常数； r —原子半径； l —立方体的对角线长； V_A —原子在晶胞中所占的体积； V_F —单位晶格的体积。

解： $\alpha = l / \sqrt{3} = 4r / \sqrt{3}$ ，

$$\eta = \frac{V_A}{V_F} \times 100\% = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{\alpha^3} \times 100\% = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi r^3}{64r^3 \cdot \frac{1}{3\sqrt{3}}} \times 100\% = 68\%$$