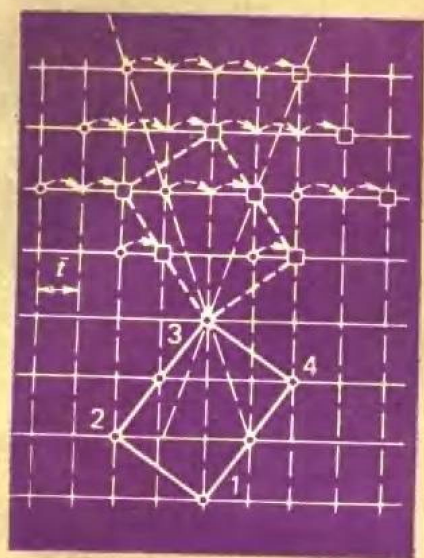




物理冶金学基础

〔美〕约翰·D·费豪文 著

卢光熙 赵子伟 译

上海科学技术出版社

物理冶金学基础

〔美〕约翰·D·费豪文 著

卢光熙 赵子伟 译

上海科学技术出版社

John D. Verhoeven
Fundamentals of Physical Metallurgy
John Wiley & Sons, Inc., 1975

物 理 冶 金 学 基 础

〔美〕约翰·D·费豪文 著

卢光熙 赵子伟 译

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海市印刷六厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 21.5 字数 516,000

1980 年 7 月第 1 版 1980 年 7 月第 1 次印刷

印数 1—5,500

书号 15119·2056 定价(科四) 2.00 元

内 容 提 要

本书主要从原理上论述如何控制金属材料的组织结构以及组织结构对机械性能的影响。前七章是基本理论和重要的实验方法,后七章是相变及其应用。全书写得比较简明扼要,引用的资料数据较新,并且注意到理论联系实际。每章之末附有习题,可供读者练习,巩固所学的知识。

本书的导论及1~6章由上海工业大学赵子伟译出,其余为吉林工学院卢光熙所译。

本书可供大专院校材料科学、金属物理、金相热处理以及其他有关专业的教师、研究生和学生参考,也可供其他有关科技工作者参考。

序

本书是根据作者讲授了几年的初级物理冶金学课程编写的,目的是使读者在物理冶金学的基础方面获得坚实的入门知识。使用本书的读者应当学习过冶金学或材料科学方面的导论性课程,采用的教材应当是象范·弗莱克(Van Vlack)或伍尔夫(Wulff)等的著作(见第1章参考文献)那样的书籍。在衣阿华(Iowa)州,根据我们的经验,相当多数进入研究院冶金系学习的学生来自物理学、化学、机械工程或化学工程这些领域,而我相信这种情况在美国是相当普遍的。希望本书对这些学生在学习导论课或自学时能够有用,也希望对大学本科学生在学习冶金学课程时有所帮助,以便使这些学生在初级或高级的水平上对物理冶金学的基础获得深刻的理解。

本书的主要目的是为理解如何控制金属的组织结构提供理论基础,并说明组织结构又如何控制着金属的机械性能。因此将本书在物理冶金学方面用作理论基础较之用作实用基础更为合适。不过,理论处理是以提供尽可能简明的第一级简单处理为目标的,导出的概念在控制机械性能方面的应用在书中后面几章叙述。

本书企图将物理冶金学方面的问题较现有教材更多地从组织结构的角度加以阐明。作者的经验是这样做在教学上的帮助很大。书的前半部(1~8章)集中在作为物理冶金学的基础的物理和化学的基本概念上。第一章给出后面章节中要用到的某些原子堆积的概念,极射赤面投影也包括在内,以便在后面应用这一重要的工具,并使读者获得一些使用它的经验。多数学生在学习X射线衍射之前并不学习这个课题,而X射线衍射这门课通常要在晚些时候才开设。在组织结构的测定这一章中,通过介绍关于晶体位向的概念强调了劳埃法,这个课题在物理冶金学的应用方面往往是重要的。还介绍了透射与扫描电子显微镜,因为它们确定金属的组织中已经变得越来越重要。位错一章放在单晶体的塑性这一章之后,因为作者发现如果读者能够首先了解由这种缺陷所控制的宏观现象,学习位错将更有意义。由于类似的原因,扩散这一章是从唯象到原子景象进行讲解的。列入了界面一章,以便强调这个问题的重要性。关于这一章的概念在多数物理冶金学教材中是分散在全书中的。我觉得把它们单独列为一个问题能够帮助读者看到它们在所有相变中的广泛作用。书的后半部(后六章)集中在相变上,同时强调了怎样将它们用于控制金属的机械性能。

在前几章中没有把晶体结构的描述和相图这两个非常重要的课题包括进去,因为这些问题在作为本书基础的那些导论性书籍中通常是重要的章节。但是我发现学生们在学习导论性课程以后,往往并没有掌握这些内容;不过通过做习题,很快就能达到要求。为此,在前四章中给了一些应用密勒指数、晶面和晶向的习题,而关于应用相图的习题则放在第6、9、11和12章中。我强烈地建议没有学过这两方面内容的读者利用导论性的书籍去学习它们,例如第1章的参考文献1和2。

每章之后备有一些习题,因为我发现为了牢固地掌握各章的内容,做习题是很重要的。

在某几章中(例如第6章),作者采用了实际应用该章所阐述的概念的习题。为了降低出版费用,书中列出的习题减少了一半。但是如有需要,函索即可寄奉附加的习题。出版费用还要求最大限度地减少书中采用的照片。因此,在合适的地方采用了示意图,读者可在一种或更多的参考文献中找到实际的照片。

和一般的物理冶金学教材一样,书中没有列入关于金属物理的一章。因为作者感到要在一章中恰当地处理这个复杂的课题是不可能的。与其使学生因所提供的材料过于简单而不能获得牢固的理解,从而产生失望,不如把它删去,并鼓励学生再去选修一门固体物理方面的导论性课程。与这点相联系的是可以看到作者强调了物理冶金学在控制机械性能方面的应用,而很少强调对电磁性能的控制。导论(第1页)中指出了这种局限性,并且作了初步的论证。就作者来说,这也是由于某些个人的偏见导致的结果,即认为在美国受教育的人们中,控制机械性能方面的主要贡献是由那些受过传统的冶金学训练的人们作出的,而控制金属电磁性能方面的成果则是由那些学物理的人们获得的。

现在已经明确,科学技术界将采用标准的单位制。这就是国际单位制(Système International d'Unités),通常称为SI单位。物理冶金学中常见的SI单位在附录中作了简短的介绍。

作者特别感谢衣阿华州立大学及其冶金系给了我大学本科学学生讲授物理冶金学课程数年的机会,这才导致了本书的产生。我也要感谢我的几位同事,托姆·斯科特(Tom Scott)博士、罗希特·特里维迪(Rohit Trivedi)博士、肯·金斯曼(Ken Kinsman)博士、弗兰克·凯泽(Frank Kayser)博士、门罗·韦克斯勒(Monroe Wechsler)博士和约翰·帕特森(John Patterson)博士,他们为我校阅了不同的章节。此外,我还要感谢密执根(Michigan)大学中我的三位过去的教授,爱德华·E·赫克(Edward E. Hücke)博士、戴维·V·雷根(David V. Ragone)博士和莫里斯·J·辛诺特(Maurice J. Sinnott)博士,他们激发了我对物理冶金学的兴趣。最后,我十分感激我的出色的秘书,维娜·汤普森(Verna Thompson)小姐,她准备和编纂了打字原稿;也感谢哈伦·贝克(Harlan Baker)先生,他准备了书中出现的几帧显微组织照片。

约翰·D·费豪文(John D. Verhoeven)

1974年10月于衣阿华 艾姆斯

目 录

导论	1
第1章 晶体的描述	3
§ 1.1 面心立方和密集六角晶体中原子的堆积	3
§ 1.2 极射赤面投影	9
第2章 组织结构的测定	20
§ 2.1 X射线衍射	20
§ 2.2 透射电子显微镜(TEM)	25
§ 2.3 扫描电子显微镜(SEM)	28
第3章 金属晶体的塑性变形	34
§ 3.1 滑移系	35
§ 3.2 分切应力(施密特因子)	37
§ 3.3 面心立方单晶体的拉伸试验	40
§ 3.4 多晶体的变形	42
§ 3.5 金属的理论强度	44
第4章 位错	47
§ 4.1 刃型位错	47
§ 4.2 螺型位错	51
§ 4.3 混合位错	53
§ 4.4 “曲折”位错的术语	55
§ 4.5 位错环	55
§ 4.6 实际晶体中的可动位错	57
§ 4.7 位错的观察	58
§ 4.8 弹性应变能	58
§ 4.9 位错的能量	59
§ 4.10 作用在位错上的力	60
§ 4.11 由位错产生的应力场	63
§ 4.12 线张力	65
§ 4.13 扩展位错	66
§ 4.14 面心立方金属中的位错	69
§ 4.15 弗兰克-瑞德位错增殖机制	74
§ 4.16 用位错运动解释塑性变形	75
第5章 空位	80
§ 5.1 空位的形成	81
第6章 扩散	86
§ 6.1 唯象理论	86
§ 6.2 原子理论	97

第 7 章 界面	105
§ 7.1 界面的分类、几何关系和能量	105
§ 7.2 界面的表面张力和表面自由能	112
§ 7.3 二维和三维空间中晶粒的形状	121
§ 7.4 晶界偏析	122
§ 7.5 晶界的运动	123
第 8 章 形核	132
§ 8.1 均匀形核	133
§ 8.2 非均匀形核	137
第 9 章 凝固	141
§ 9.1 形核	141
§ 9.2 纯金属的凝固	144
§ 9.3 合金的凝固	148
§ 9.4 共晶合金的凝固	159
§ 9.5 铸造金属	168
第 10 章 回复与再结晶	197
§ 10.1 储藏能	198
§ 10.2 退火时储藏能的释放	199
§ 10.3 回复动力学	202
§ 10.4 再结晶的形核机制	203
§ 10.5 再结晶动力学	205
§ 10.6 再结晶温度与晶粒尺寸的控制	210
§ 10.7 其他有关的问题	212
第 11 章 固溶体中的析出	218
§ 11.1 自由能-成份图的复习	218
§ 11.2 析出转变	224
§ 11.3 固态下的形核	229
§ 11.4 析出反应的动力学	239
§ 11.5 析出硬化	243
第 12 章 平衡析出相的扩散控制长大	253
§ 12.1 单相析出	253
§ 12.2 共析转变	257
§ 12.3 不连续析出	267
第 13 章 马氏体转变	274
§ 13.1 孪生	275
§ 13.2 马氏体转变的晶体学	281
§ 13.3 马氏体转变的某些特征	286
§ 13.4 热力学	292
§ 13.5 热弹性马氏体	293
§ 13.6 马氏体转变的其他特征	295
§ 13.7 马氏体的形核	297
§ 13.8 总结和与块状转变的比较	298

§ 13.9 贝氏体	299
第 14 章 物理冶金学的某些应用	306
§ 14.1 强化机制	307
§ 14.2 强度与塑性	310
§ 14.3 某些高强度钢的物理冶金学	312
附录 国际单位制(SI)	331
索引	333

导 论

根据考古学家把人类历史的发展阶段划分为青铜时代和铁器时代的事实, 就可以充分说明在人类历史发展的过程中, 金属一直起着极为重要的作用。对于近一百二十年来已经极大地改变了我们祖祖辈辈的日常生活的工业化过程来说, 金属的重要性尤为明显。为了说明这一点, 我们来分析一下运载工具。如果没有金属, 要制造汽车、火车、飞机、拖拉机、船舶、自行车、滑坡车^①等都是不可能的。很清楚, 金属在这些运载工具, 尤其是在驱动这些运载工具的发动机中起着关键性的作用。当我们走过任何一个工厂, 无论它是化工厂、机械厂、电子工厂、核工厂或其他各类工厂时, 也可以明显地看到金属的这种关键性作用。如果我们稍加思考, 金属在改变我们的家庭生活中所起的重要作用也是很明显的。请看一看下列在我们看来已经十分平常, 而在我们十九世纪祖先的家庭中却是没有的一些器件:

卫生管道系统

电线和电灯

电气炉灶

电冰箱

洗衣机和烘干机

洗碗机和垃圾处理装置

采暖锅炉和管道

收音机和电视机

铝窗框架

空调装置

在所有这些器件中, 都有一些金属起着重要作用的地方, 以致于没有金属要想生产这些器件就非常困难, 而且往往是不可能的。当然, 除金属外, 其他许多材料在现代工业中许多产品的制造方面也有非常重要的作用。例如, 汽车轮胎是用橡胶制成的, 而透明窗户的材料为玻璃。

设计工程师总是选择那些具有所要求的物理性能而又最经济的材料。在人类历史的发展过程中, 金属之所以起着重要的作用是由于金属实际上具有下述三个主要的物理性能:

(1) 可成形性。值得指出的是, 我们使用的金属零件实际上都是采用机械方法成形的。只有大约 20% 的金属直接在铸态下使用。

(2) 具有较高的强度而无脆性。有许多材料例如玻璃, 尽管强度很高, 但却极脆。因此虽然玻璃的屈服强度要比最好的铝合金高七倍, 但决不能梦想设计出一架飞机, 其机翼可用这种玻璃来制造。

(3) 良好的电学性能和磁学性能。这里的关键性性能是金属中相当小的电阻率以及黑色金属的磁化性能。

物理冶金学主要研究金属的原子排列和显微组织对金属的物理性能的影响。它们之间的关系可以粗略地概括于下表中:

^① Skate board 暂译为滑坡车。这是一种儿童玩具, 是下面装有四个轮子的长约二英尺的长板。儿童骑在板上, 从斜坡上向下滑行。——译注

物 理 性 能	原子排列和缺陷的影响	显微组织的影响
机械性能 { 强度 塑性	很 强	很 强
电学和热学性能 { 电阻率 磁化性能 热传导性	微 弱	弱 → 强
化学性能 { 抗腐蚀性 催化能力	微 弱	微弱 → 中等

从这个表可以看出,通过控制原子排列和显微组织,人们可以在某种程度上控制金属的所有物理性能,尤其是机械性能。因此,在本书的最后几章中,我们将着重讨论对金属机械性能的控制。经由铸造、压力加工和热处理等工序,冶金工作者能够控制金属的原子排列和显微组织。本书的主要目的之一就在于提供这方面的理论基础,以便使读者了解这些工序是怎样和为什么能改变金属的原子排列和显微组织的。

第1章 晶体的描述

如果考察一下日常接触的绝大多数非金属固态材料,就会发现就其外形而论,与多数金属材料并没有什么显著的不同。因此,当指出金属具有一定的晶体结构,而木材、塑料、纸张、玻璃等却不是晶体时,许多人往往会感到惊讶。由于金属的晶体结构对金属的性能有很大的影响,故有必要很好地掌握晶体的初步概念。

所谓金属是晶体,就是说金属的原子是按照一定的几何方式在空间作周期性的重复排列的。正如导论性的教科书^[1,2]中所指出的那样,金属的晶体结构可以用布喇菲 (Bravais) 点阵加以描述。金属具有特别简单的晶体结构。在 14 种布喇菲点阵中,除四种金属外,所有金属都形成下列之一的极为简单的结构: (1) 面心立方结构; (2) 体心立方结构; (3) 密集六角结构; (4) 正方结构。随着温度的变化,许多金属还会呈现出不止一种的晶体结构,但是,晶体结构的这种转变,在大多数情况下是在这四种简单的晶体结构之间进行的。

这里假定读者已经熟悉晶体结构的几何学。同时假定读者已经掌握这些结构的旋转对称性、描述晶体中的方向和平面的晶向指数 $[xyz]$ 和密勒 (Miller) 指数 (hkl) 的用法,并且了解晶向指数 $\langle xyz \rangle$ 和晶面指数 $\{hkl\}$ 的意义 (参见参考文献 1, 第 74~89 页; 或参考文献 2, 第 45~50 页和第 208~214 页)。本章后面列出的前七道习题可以帮助读者复习这些概念。

§ 1.1 面心立方和密集六角晶体中原子的堆积

在上述方法中,金属晶体的原子结构是用空间点阵中原子的排列情况来描述的。对于金属所具有的简单晶体结构而言,还可以用其他更有效的方法加以描述。我们把金属晶体中的原子看作大小相等的球体,当然这只是近似的,但是却为我们提供了相当可靠的第一级近似,而这在许多情况下是非常有用的。

使金属原子结合在一起的金属键方向性很小。因此可以认为,这种将金属原子拉在一起的吸引力将使金属原子在各个方向上都等地堆积起来,并使各金属原子间具有最小的间隙空间。如果把原子视为刚球,现在问: 将大小相等的刚球堆积在一起,并使各刚球之间的空隙达到最小,可以有几种堆积方式? 由于明显的原因,这种结构称为“密集结构”。下面我们来讨论这个问题。首先,我们在二维平面上确定这些刚球怎样排列才能形成最密排的平面阵列。然后确定这些最密排的原子面以怎样的最密集方式加以堆积,才能得到最密集的三维阵列。考虑图 1.1(a) 中的两排原子。很明显,如果这两排原子靠在一起,而且上面一排原子被推到图 1.1(b) 所示的位置,那么这两排原子将最紧密地排列在一起。如果象图 1.2(a) 那样重画图 1.1(b), 便可看出在二维平面上密排原子的中心将构成六边形的网格。为了便于分析这些密排面的堆积情况,考虑图 1.2(b) 所示的六边形区域。值得注意的是,这个六边形网格单元可以看作是六个等边三角形,而且这六个三角形的中心与密排原子的六个空隙中心相重合。图 1.3(a) 表明这六个空隙可以分为 B 、 C 两组,每一组构成一个等

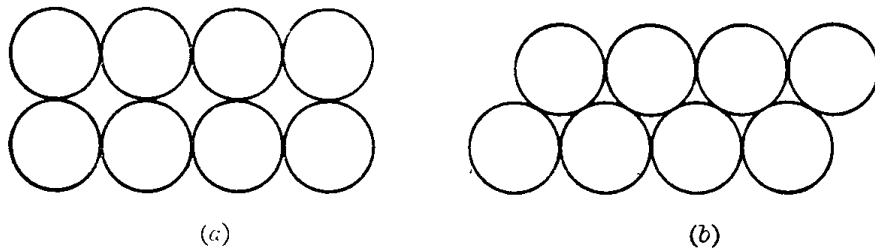


图 1.1 二维排列方式

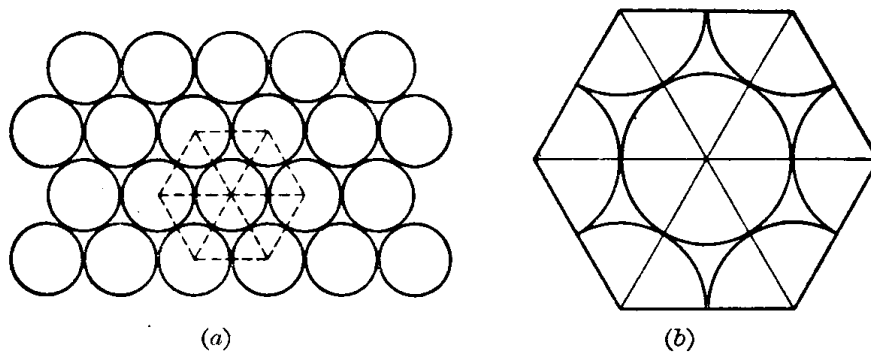


图 1.2 二维最密排方式中的六边形

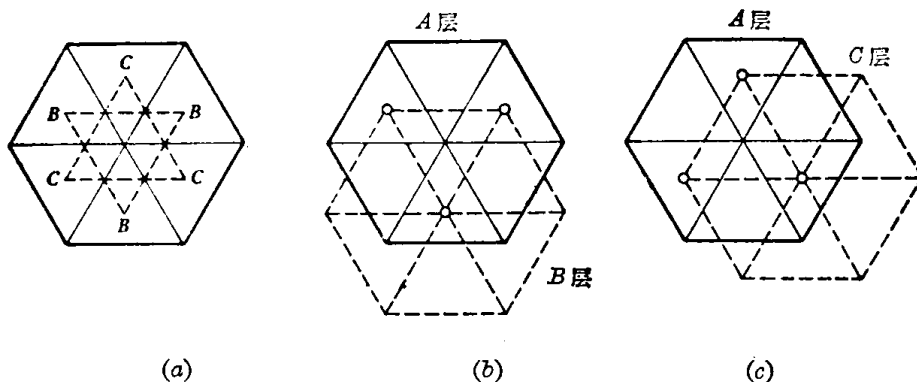


图 1.3 空隙位置和密排面的堆积方法

边三角形, 同时在每一组中, 空隙中心间的距离恰好是网格上原子的间距。因此, 当在第一层上堆积第二层密排面时, 使其原子落在空隙 B 处就可得到最密集的三维空间阵列, 如图 1.3(b) 所示。此外, 也可将第二层原子堆在空隙 C 处, 以获得如图 1.3(c) 所示的最密集三维空间阵列。如果把第一层原子所占据的位置称为 A 位置, 那么, 图 1.3(b) 便属于 $A-B$ 堆积方式, 而图 1.3(c) 是 $A-C$ 堆积方式。为了得到晶体结构的模型, 各原子层必须继续堆积下去, 以便获得长程有序的排列。显然, 只存在四种可能的堆积方式: (1) $-A-B-A-B-A-B-$; (2) $-A-C-A-C-A-C-$; (3) $-A-B-C-A-B-C-$; (4) $-A-C-B-A-C-B-$ 。对于两种不同的晶体, 第(1)种与第(2)种堆积方式之间的差异是难以辨别的。第(3)种和第(4)种堆积方式也是如此。因此, 只有两种堆积方案: 一种是每二层重复一次, 即 $-A-B-A-B-A-B-$; 另一种是每三层重复一次, 即 $-A-B-C-A-B-C-$ 。

密集六角晶体结构和面心立方晶体结构都是密集结构; 它们对应于这里所讨论的两种堆积方式。在密集六角晶体结构中, 基面是密排面。从图 1.9 可以看出, 这些面上的原子是一个在另一个之上直接堆积起来的, 它们中间只插入一个密排面, 即 (0002) 面。因此, 在密集六角结构中, 密排面堆积的层序是 $-A-B-A-B-$ 。在面心立方结构中, 密排面为 (111) 面,

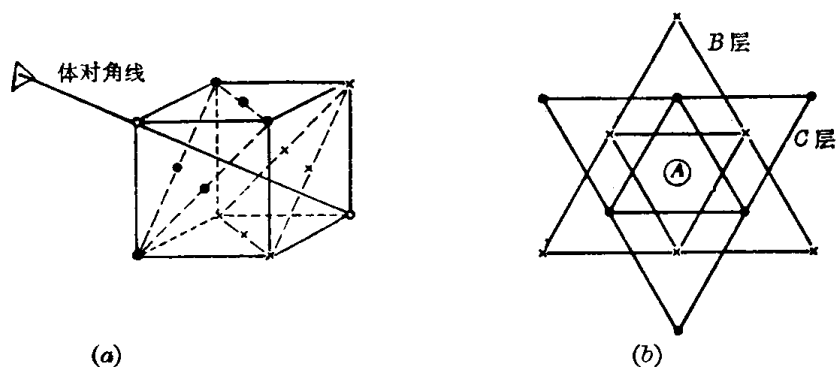


图 1.4 面心立方晶体中的密排面

图 1.4(a) 给出了其中的两个密排面在晶胞上的交线。如果沿图示的体对角线方向向下看, 这两个密排面便如图 1.4(b) 所示。显然, 这两个面是相互邻接的密排面, 分别称之为 B 层和 C 层。体对角线上两顶角上的原子分别位于两个相互平行的 (111) 晶面上; 应当看到, 这两个晶面应当处于 A 位置, 这是因为这两个晶面的原子位于 B 层和 C 层的剩余空隙之上。因此, 在面心立方结构中, 密排面的堆积层序是 $-A-B-C-A-B-C-$ 。

体心立方晶体结构不是密集结构。在这种结构中, 沿立方体对角线方向的原子是相互接触的。由此可以推论, 体心立方结构比密集结构包含着较多的间隙空间(见习题 1.7)。

一、原子堆积中的空隙位置

钢中碳原子的有效半径为 0.7 埃, 而铁原子的有效半径为 1.24 埃。碳溶解于铁中时, 或者替代点阵阵点上的铁原子(作为置换型溶质), 或者挤进铁原子的间隙位置(作为间隙型溶质)。由于碳的原子半径很小, 于是象氮、氢和氧一样, 碳在铁中也呈间隙型溶解。这些原子对金属, 尤其是体心立方金属的机械性能产生很强烈的影响, 因此, 了解球体堆积模型中球体之间的空隙大小和位置是很有必要的。

空隙可以用其配位数来表征, 在这里, 配位数规定为最邻近的原子数目。通过考虑体心立方晶胞中体心的那个原子, 就可明显看出这种晶体中每个原子的配位数为 8。空隙的配位数可以用同样的方法加以确定。首先, 找出这个空隙的中心位置, 然后确定该空隙周围最邻近的原子数目。作为一个简单的例子, 先看看图 1.2 中密排面上的空隙。可以看出, 每个空隙的周围有三个最邻近的原子, 因此配位数为 3, 于是这种空隙可称之为三角形空隙。我们最为关心的是: 在图 1.5 所示的空隙中能够容纳多大的刚球? 假定密排原子刚球的半径为 R , 空隙中所能容纳的刚球半径为 r , 那么, 如图 1.5(b) 所示, 根据简单的几何学关系

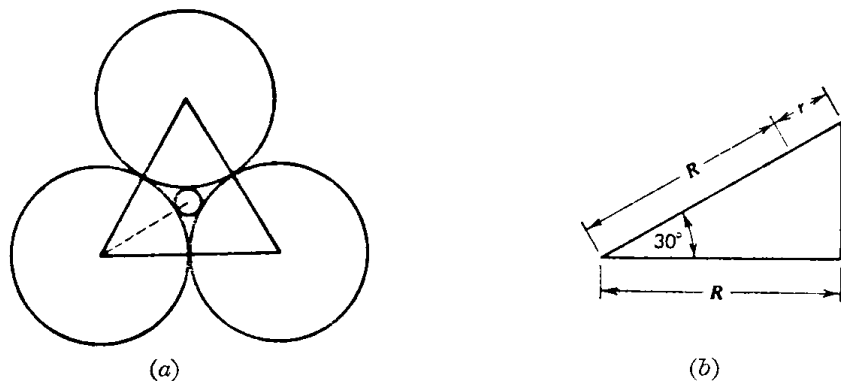


图 1.5 二维平面空隙中刚球的最大尺寸

表 1.1 面心立方、密集六角和体心立方结构中的空隙

晶 体 结 构	空 隙 类 型	配 位 数	r 的 最 大 值
密 集 结 构	四 面 体	4	$0.225 R$
密 集 结 构	八 面 体	6	$0.414 R$
体 心 立 方	四 面 体	4	$0.291 R$
体 心 立 方	八 面 体	6	$0.154 R$

可知， r 的最大值为 $0.155R$ ①。

如表 1.1 所示，在两种密集晶体结构中只存在两种类型的空隙。四面体空隙周围的四个原子中心彼此相连，构成一个规则的四面体(各边相等)。同样，如果把八面体空隙周围的六个原子中心连接起来，也将形成一个规则的八面体。为了帮助阐明其几何概念，图 1.6 绘出了这两种多面体的简图，空隙分别位于该两图的中心。确定能放进空隙的球体的最大尺寸在几何学上是一个很有趣的问题，表 1.1 给出了计算结果。必须了解，这两个多面体只是用来描述空隙并确定空隙的位置的。空隙本身并不是多面体，而是处于多面体中心的孔洞。

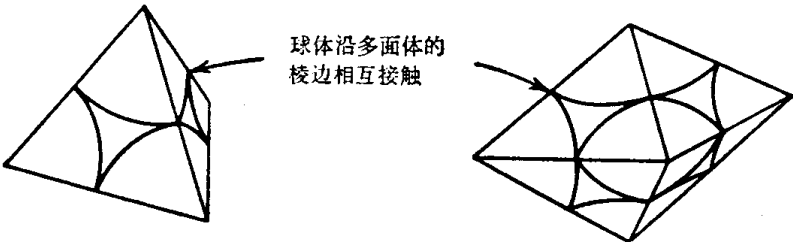


图 1.6 最密集原子间的四面体空隙和八面体空隙

如果从密集结构中拿掉一个原子，就可得到配位数为 12 的空隙。由于这种空隙直接位于点阵的阵点上，故而不是间隙式空隙。这种类型的空隙是晶体结构中的一种缺陷，这种缺陷叫做空位(Vacancy)。

面心立方晶胞中围绕两个四面体空隙的四面体的位置示于图 1.7。分析该图可以看

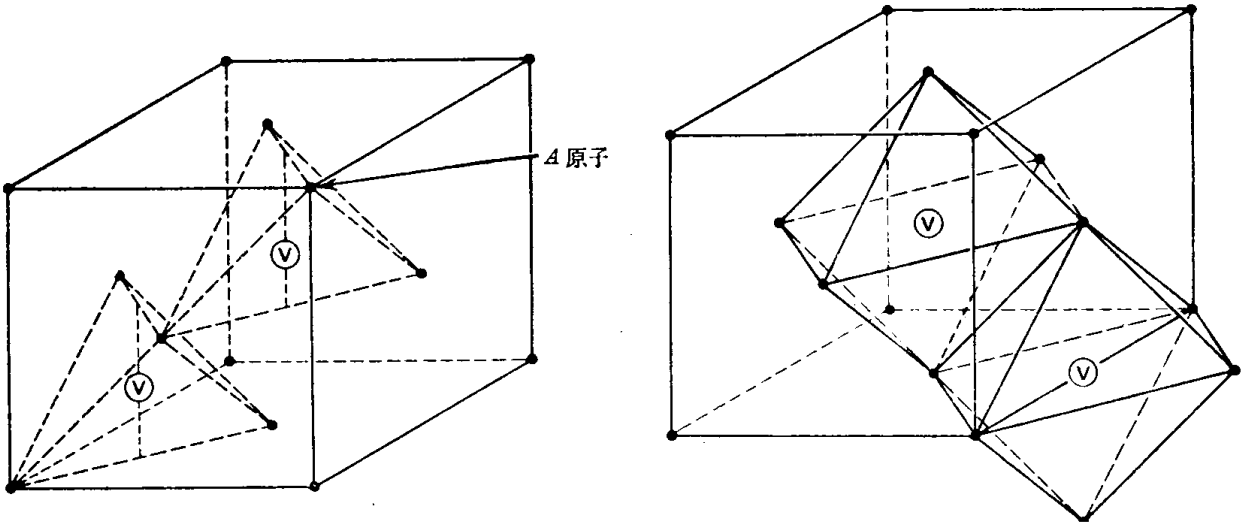


图 1.7 面心立方晶胞中两个四面体空隙的位置 图 1.8 面心立方晶胞中两个八面体空隙的位置②

① 原文误为 $1.55R$ 。——译注
② 原图中晶胞中心的八面体空隙漏画一条虚线，已补上。——译注

出. 相对于 A 原子来说, 上面那个空隙的中心的坐标为 $-\frac{1}{4}, -\frac{1}{4}, -\frac{1}{4}$, 因此是在立方体的体对角线上。现在问: 在该晶胞中包含有多少个这类四面体空隙? 这个问题可以容易地用面心立方晶体的四次转动对称轴来解答, 通过绕垂直轴的四重转动, 上述两个空隙都会产生另外三个空隙, 因此, 这个晶胞共包含八个这种空隙。

如图 1.8 所示, 面心立方晶体有一个恰好位于晶胞中心处的八面体空隙。该图还表明, 另一个八面体空隙位于晶胞一条棱边的中心处。而且运用面心立方晶体的四次转动对称轴, 很容易推知在晶胞的十二条棱边的中心处必然各有一个八面体空隙。现在问在这个面心立方晶胞中包含多少个八面体空隙? 读者可以自己求得其答案为 4。

从图 1.8 可以看出, 在晶胞下部右前方二个八面体空隙之间紧连着一个四面体空隙。如果在图 1.8 上把其他八面体空隙的八面体都画出来, 那么将可看出各四面体空隙的四面体恰好处于各八面体之间, 以致不再存在自由空间。这就表明整个空间可以通过堆积棱边长度相同的规则四面体和八面体而被完全填满。当各个八面体的棱边与棱边相接触时, 这种堆积方式便相当于面心立方晶体中空隙的组态。

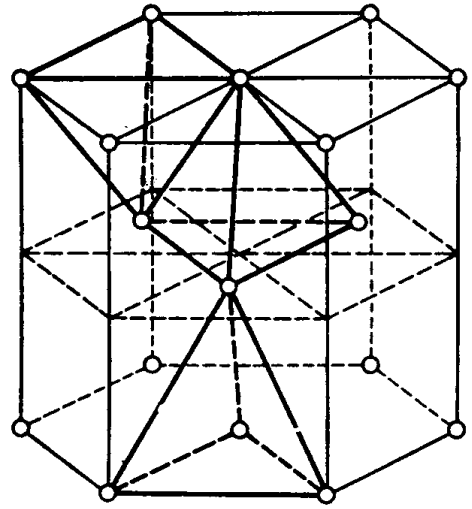


图 1.9 密集六角晶胞中三个四面体空隙的位置

图 1.9 给出密集六角晶胞中三个围绕四面体空隙的四面体, 应用密集六角晶体的三次转动对称轴^①, 可以很快证明密集六角晶胞中含有八个四面体空隙, 其中两个以围绕它们的四面体的一个面相接触。

根据与图 1.9 相类似的图可以确定密集六角晶体中八面体空隙的位置, 而且可以再次发现四面体与八面体是紧密地连接在一起并充满整个空间的。但是, 对于密集六角结构而言, 在 c 轴方向, 八面体之间以面与面相接触; 而在其他方向是棱边与棱边相接触。显然, 由上述讨论可知, 将规则的四面体和八面体堆积起来使晶体空间能够完全被填满可以有两种不同的方式。其中之一相当于密集六角结构中的空隙组态, 另一种相当于面心立方结构中的空隙组态。

图 1.10 给出体心立方结构中八面体和四面体空隙的位置。必须注意, 连接最邻近原子所形成的多面体是不规则的多面体, 其中有的边长为 a , 而另一些边长却为 $0.866a$ 。八面体空隙位于晶胞中各个面的中心处和每条棱边的中心处。四个四面体空隙位于晶胞的各个面上。这里需要指出的是, 与密集晶体不同, 体心立方晶体中的四面体实际上被包含于八面体之中。读者也许会感到奇怪, 为什么不把四面体空隙简单地当作八面体空隙的一部分来考虑呢? 理由是, 如果在四面体空隙中放置一个最大尺寸的刚球, 这个刚球就会陷在那里, 除非它把邻近的原子推开, 这个刚球是不能移到邻近的八面体空隙中去的。由表 1.1 可以看出, 四面体空隙所能容纳的最大尺寸的球体比八面体空隙所能容纳者为大。

从实用观点来看, 体心立方金属中的空隙可能比面心立方金属中的空隙更为重要, 这是因为间隙原子对体心立方金属的机械性能起着更重要的作用。其原因部分地是由于邻近的

^① 原文误为六次转动对称轴。——译注

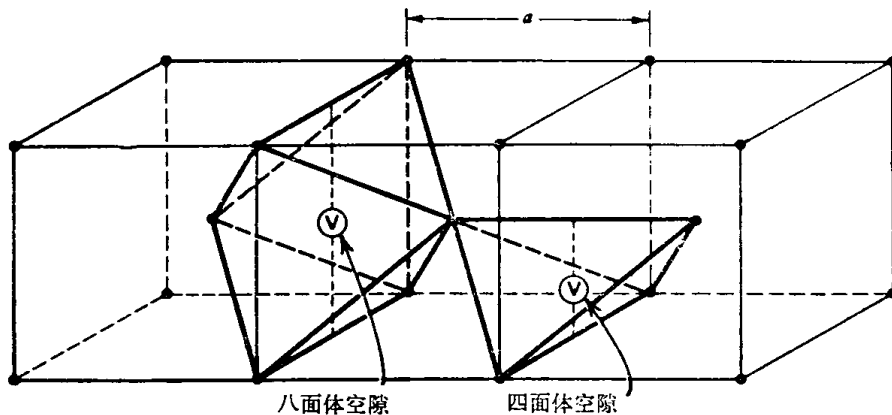


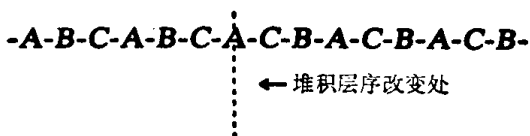
图 1.10 体心立方晶体中八面体空隙与四面体空隙的位置

原子形成不规则的多面体，因而当一个间隙原子在各空隙之间运动时会使晶体产生不对称的畸变。

二、堆积缺陷

密集晶体中，长程堆积层序的破坏会产生两类常见的晶体缺陷：(1) 孪晶区；(2) 堆积层错 (Stacking fault)。堆积层序在许多原子间距范围内改变时便产生孪晶；而当堆积层序的改变只发生在几个原子间距的范围内时，则为堆积层错。下面以面心立方晶体为例来说明。

1. 孪晶 孪晶的堆积层序为：



为了描述堆积层序的改变对晶体结构几何学的影响，有必要画出(111)密排面的侧视图 (edge view)。图 1.11(a) 示出了面心立方晶胞上 (111) 及 $(\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2})$ 晶面的交线 (trace)。如果沿 $[\bar{1}10]$ 方向观察这个晶胞，便可看出 (111) 晶面的侧视图，而且观察方向和 $(\bar{1}10)$ 晶面成直角。图 1.11(b) 给出了 $(\bar{1}10)$ 晶面的这种视图。我们把 (111) 晶面称作 B 面，而把 $(\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2})$ 晶面称作 C 面。另外，与其平行的、过图 1.11(b) 上的原子 1 和原子 3 的平面称作 A 面。

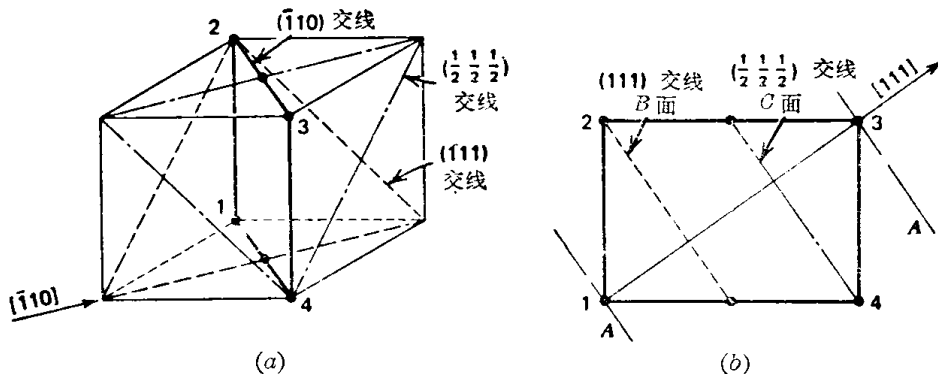


图 1.11 (a) 确定 $(\bar{1}10)$ 晶面交线的面心立方晶胞；(b) 表明密排面的侧视图的 $(\bar{1}10)$ 晶面