

中等专业学校教学用书

# 金属学

(修订第三版)

李惠忠 编



中国工业出版社

中等专业学校教学用书



# 金 属 学

(修訂第三版)

江苏工业学院图书馆  
季忠 編  
藏书章

中国工业出版社

本书内容包括金属的结构与结晶、塑性变形与再结晶、合金的状态图、钢的热处理等，对碳素钢、合金钢、铸铁、有色金属及合金等主要金属材料的分类、结构、性能和用途等基本概念也作了专门的介绍。

本书是修订第三版，这一版的内容比过去精简，分量较少，并重新选用了插图，增加了思考题。

本书是中等冶金专业学校轧钢、炼钢、炼铁和电炉炼钢等专业的教学用书，也可供冶金厂和机械厂有关技术人员和工人参考。

## 金 属 学

(修订第三版)

李 惠 忠 编

✱

冶金工业部工业教育司編輯 (北京市大街78号)

中国工业出版社出版 (北京佟麟阁路西10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 各地新华书店经售

✱

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$  · 印张 $7 \frac{1}{2}$  · 插页1 · 字数190,000

1959年11月原冶金工业出版社北京第一版

1965年8月北京新二版 · 1965年8月北京第六次印刷

印数13,187—20,276 · 定价(科四)0.90元

✱

统一书号: K15165 · 119 (冶金-46)

### 第三版序言

本书自 1959 年再版以来，已将近五年了。这几年，在党的教育方针正确指导下，在深入贯彻“少而精”原则的过程中，我们逐渐觉得原书在内容上有许多不足之处，难以适应本课程教学质量继续提高的需要。1963 年 11 月，八个兄弟学校的有关教师在制订金属学教学大纲期间，曾对原书提出不少有益的批评与宝贵的意见。我们接受了这些意见，并参照几年来在教学过程中积累的資料，决定对原书进行一次较大的修改。

这次修改是以新订的金属学教学大纲为依据的。由于新订的大纲是四个专业（轧钢、电冶、炼钢、炼铁）共用的，而且各专业的教学时数相差较大，只能以教学时数较多的轧钢专业为主，进行修订。但是为了便于其它专业使用，在有关章节中作了相应的安排，尽可能适应不同专业的需要。其次，为了便于学生复习，根据历年来教学实践与需要，安排了一定数量的思考题。

在这次修订中，保留了詹方海同志所写的第十一章第二节，以及曹万正同志所写的第十章的部分内容。

这次修改工作，曾得到本校金工教研组曹万正同志热诚帮助，承北京钢铁学院宋维锡、刘国勋同志负责审阅，在此表示深切的谢意。

这次修订工作，在贯彻“少而精”原则方面，还做得不够，希望使用本书的同志继续提出批评与指正，以便进一步提高本书的质量。

北京钢铁工业学校 李惠忠

一九六四年九月



# 目 录

## 第三版序言

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 緒論                      | 1   |
| 第一章 金属的晶体结构与結晶          | 5   |
| § 1. 金属的晶体结构            | 5   |
| § 2. “金属的結晶和鑄态組織        | 13  |
| § 3. 金属的同素异晶轉变          | 22  |
| 第二章 金属的金相研究法与机械性能試驗     | 26  |
| § 1. 金相研究法              | 26  |
| § 2. 金属的机械性能試驗          | 33  |
| 第三章 金属的塑性变形与再結晶         | 42  |
| § 1. 金属的塑性变形及其对組織与性能的影响 | 42  |
| § 2. 加热对塑性变形后金属組織与性能的影响 | 48  |
| § 3. 金属的热塑性变形 (热加工)     | 51  |
| 第四章 合金的构造和合金状态图         | 55  |
| § 1. 合金的构造              | 55  |
| § 2. 二元合金状态图            | 61  |
| § 3. 三元状态图概述            | 84  |
| 第五章 鉄碳合金状态图             | 91  |
| § 1. 鉄碳合金中的基本相          | 91  |
| § 2. 鉄碳合金状态图的分析         | 93  |
| § 3. 鉄碳合金的結晶过程和組織       | 96  |
| § 4. 鉄碳合金状态图与合金性能的关系    | 104 |
| 第六章 鋼的热处理基础             | 107 |
| § 1. 概述                 | 107 |
| § 2. 鋼在加热时的轉变           | 109 |
| § 3. 鋼在冷却时的轉变           | 113 |
| 第七章 鋼的热处理种类             | 125 |
| § 1. 鋼的退火               | 125 |
| § 2. 鋼的正火               | 131 |

# VI

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| § 3. 鋼的淬火 .....           | 133 |
| § 4. 鋼的回火 .....           | 142 |
| § 5. 鋼的表面热处理 .....        | 147 |
| 第八章 碳素鋼 .....             | 153 |
| § 1. 碳素鋼及其分类 .....        | 153 |
| § 2. 碳及杂质对鋼性能的影响 .....    | 154 |
| § 3. 碳素鋼的編号和用途 .....      | 157 |
| 第九章 合金鋼 .....             | 165 |
| § 1. 概述 .....             | 166 |
| § 2. 合金鋼理論基础 .....        | 169 |
| § 3. 合金結構鋼 .....          | 181 |
| § 4. 合金工具鋼 .....          | 189 |
| § 5. 特殊性能鋼 .....          | 197 |
| 第十章 鑄鉄 .....              | 205 |
| § 1. 白口鉄、灰口鉄、变质鑄鉄 .....   | 205 |
| § 2. 可鍛鑄鉄、球墨鑄鉄、合金鑄鉄 ..... | 211 |
| 第十一章 有色金属 及其合金 .....      | 215 |
| § 1. 銅及其合金 .....          | 215 |
| § 2. 鋁及其合金 .....          | 221 |
| § 3. 軸承合金 .....           | 227 |
| § 4. 硬质合金 .....           | 230 |
| 附表 布氏、洛氏和維氏硬度数的关系 .....   | 233 |
| 参考文献 .....                | 234 |

## 緒 論

金属学是研究金属和合金的成分、内部构造（組織）、性能以及它們之間相互关系的一門科学。

对純金属而言，金属的性能首先与各个元素的本性有关。例如，純銅比純鉄具有高的导电、导热率和良好的塑性，但它的强度和硬度較純鉄为低。

合金的性能与其中各元素的含量即合金的組成密切有关。例如，含碳量为 0.3% 的鉄碳合金（鋼）可以承受压力加工，使其变形而不破裂，因而可采用鍛造方法来制成零件；但含碳量为 3.0% 的鉄碳合金（生鉄）不能承受任何压力加工以改变其形状，而只能采用鑄造方法来制成零件。显然，鉄碳合金成分变化与合金内部构造的改变有密切联系。由于构造不同在性能方面就有很大的差别。

然而，合金的内部构造和性能不仅取决于合金的化学成分，还取决于合金的热处理工艺条件。例如含碳量均为 0.8% 的两块鉄碳合金，一块經加热到  $770^{\circ}\text{C}$  在炉內緩慢冷却（退火）后，具有較低的硬度和强度，另一块經加热到同一溫度而在水中急冷（淬火）后，硬度和强度就較前者提高三四倍，这一性能的差别使前者可用做被切削物件，而后者可用来制造切削工具。

又如，在同一炉中熔炼出来的液态合金（生鉄），在两种不同的条件下进行浇注，一为不加入任何物质而直接注入模中，另一为加入极其微量的合金元素（鎂、硅）后再注模中，結果就得到性能很不相同的两种鑄件，前者强度低，性质脆；后者强度高而脆性小。

再如，同一成分的合金經不同程度的冷变形則得到性能不同的制件，冷变形程度大者，制件的硬脆性高；冷变形程度小者，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构造的改变密切相关的。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内部构造。

金属学就是一門研究金属和合金的成分、性能、内部构造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工业材料，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。无论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門知識。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、性能和内部构造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，以提高产品的质量和产量，降低废品率；合理地选择和使用金属材料，以充分发挥材料能力，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之一，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，中国在殷商时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，創造了含錫量較高的錫青銅；而制造钟及鼎用的合金則含錫量較少；为了节省錫料而創造鋁錫青銅以制成生活



用具，如針、錐、裝飾用品等。

在兩千多年前的“呂氏春秋”這一著作中，記載了古代對於銅錫合金性質的研究結論，這一結論是同現代金屬學的原理相符合的。

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對鋼和鐵性質的了解和正確的應用。譬如為使劍刃鋒利而劍身柔韌，則劍刃宜用鋼制，而劍身宜用柔鐵。

在十四世紀明朝曹昭所著的“格古要論”（1388）一書之金鉄論中，記載了檢查金、銀、銅、鉄及其合金的綜合方法，其中以粗視分析法為主。該書提供了通過粗視組織的觀察和分析以判斷金、銀及其合金的質量；同時為了考查金和鋼鉄的質量，還利用了不同的浸蝕劑。

這一著作總結性地記載了長時期來，我國古代人民考查金屬方法的成就。並且對制备金屬粗視試面的過程大体上與現代金屬中檢查金屬粗視試面的過程相符合。

我國古代在金屬熱處理方面也有很大成就。在東漢班固所著“漢書”中王褒傳上說：“清水淬其鋒”。這就說明遠在漢朝就能用熱處理方法使刀劍更為堅硬和鋒利。

在明朝宋應星所著的“天工開物”（1637）一書中總結了我國古代在鋼鉄熱處理方面所積累的成就。該書首先說明熱處理的作用，並指出為了提高鋼鉄的強度和硬度，只有通過熱處理來達到，否則弱性仍存；其次該書對各種工具和農具（如銼、鉋、鋸、斧、鋤等）的熱處理方法及效果加以詳細說明。這些記載都是合乎近代熱處理原理的，而時間卻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應用已很普遍，流傳已經很久，才經個別有志之士編寫成文，載入史冊。然而，由於我國長期處於封建制度的束縛，以及近代帝國主義和國內反動派的統治，我國古代勞動人民所取得的科學技術上的光輝成就從未能得到系統的整理和充分的发展。

解放後，我國人民在黨的正確領導下，迅速恢復并發展了國

民經濟，建立了我国工业現代化的基础。我国的金属科学和其它事业一样，得到巨大的发展，并已取得一定的成就。

在科学院和各工业部門，設立了金属研究机构；在許多高等学校和工厂中建立了金属試驗室。这些从事金属学工作的机构无疑地为培养金属学方面的人才，解决生产中的問題，推动我国金属学的发展，都起着重要的作用。

在鋼鉄生产方面，与大力增加产量的同时，扩大了品种，提高了质量。特別在最近几年，鋼鉄品种和质量取得了突出的成就，基本上滿足我国各工业部門的需要。目前，我国已能冶炼出技术要求很高的各种合金鋼，并且結合我国資源情况，試驗和生产出許多新的合金鋼种，建立了以我国富产的資源为基础的合金鋼系統，为我国工业和尖端技术发展提供了有利的条件。在提高鑄鉄性能，扩大鑄鉄应用范围方面，我国也取得很大的成就。

近年来，金属学实验工具与新技术也得到了进一步发展。我国已能自制各种机械性能試驗机、光学金相显微鏡、电子显微鏡、高溫金相显微鏡、X射綫仪等，这为滿足金属学科学研究和教学需要，为改进和指导生产工艺，有着重要的意义。

本书包括下面五方面內容：

1. 金属的晶体結構与結晶：研究金属的晶体結構及其特点，从金属由液态轉变为固态的結晶过程和影响这一过程的因素来了解鑄造金属的构造，以及在固态下当溫度改变时金属內部組織結構所发生的变化。

2. 合金系：研究合金的构造，合金在不同溫度下所处的状态，以及合金的成分、組織和性能之間的关系。

3. 金属和合金的研究和試驗方法：研究和分析金属的組織和缺陷，以及試驗和測定金属的性能。

4. 鋼的热处理：研究鋼在加热和冷却时組織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. 金属材料：研究各种成分合金（碳素鋼，合金鋼，鑄鉄，有色金属和粉末合金）的組織、热处理、性能以及它們的用途。

# 第一章 金属的晶体结构与结晶

## § 1. 金属的晶体结构

### 1. 金 属

在全部的化学元素中，約有四分之三是金属元素。在周期表中，金属元素是在左方(表 1-1 中黑綫以左)。

金属表现出与非金属不同的物理特性，即金属具有良好的导电性、导热性、可鍛性和金属光泽。

金属的物理特性，是由金属原子结构的特点和原子結合方式所决定的。

金属原子的结构与非金属一样，都是由原子核和核周围各层的电子所組成。金属原子结构的特点是，最外电子层上的电子数目比較少(一般只有 1~2 个，少数是 3~4 个)。这些电子因与原子核的結合力較弱，容易脱离最外电子层軌道作自由运动，所以叫做自由电子。原子失去最外层电子后就变成正离子。

金属原子是依靠自由电子与正离子之間的引力而結合在一起。自由电子自由运动于各正离子之間，为整个金属所共有(图 1-1)。所以整个金属可以看作为一个巨大的分子。

金属原子的这一結合方式，不同于非金属物质，例

如氯化鈉 ( $\text{NaCl}$ )，它是以正、負离子 ( $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ ) 間的靜电引

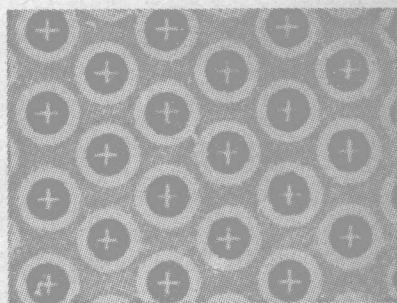


图 1-1 金属结构示意图。在晶格結点上为正离子；在晶格結点間隙处为自由电子

力結合在一起。其中不存在公有化的自由电子。

由金属原子的結合方式，能够說明金属的物理特性，譬如，导电性是通过电子定向的运动而产生的，只要金属两端在很小的电位差影响下，自由电子就能作定向流动，形成电流；再如，导热性是借助于原子的振动能的传递而产生的，金属的某一部分受热而获得的能量，借助于自由电子的运动就能迅速地将能量传到邻近的正离子，以至于整个金属块；又如，可鍛性是金属在外力作用下，通过物体内部原子层相对的移动引起的，在金属中，由于自由电子的运动，使相对移动后的正离子层仍然被自由电子联系在一起，因而金属能够被鍛打成形、軋压成片、拉拔成絲。

必須指出，金属的上述物理特性只是表現在由大量原子集成固态的金属块上，而不能由气态中单个的金属原子表現出来。在固体状态下，金属原子怎样集合在一起，以哪些形式集合，这就是下面要討論的晶体結構的内容。

## 2. 金属的晶体结构

1) 晶体 所謂晶体就是原子作有規則排列的物体。所有固态金属和合金都属于晶体。反之，原子作不規則排列的物体称为非晶体，如松香、玻璃、树胶等。

不論金属或非金属，原子所以作有規則排列成晶体，是与原子間相互作用力或相互的位能有关。原来，在原子之間除了异性电质点（电子与正离子）之間的吸引力外，尚有同性电质点（电子与电子、正离子与正离子）之間的排斥力。这两种力的大小分别随原子間的距离而变化。图 1-2 表示两原子間作用力与原子間距的关系。从图中合力曲綫看出，当原子間距  $r=r_0$  时，原子間引力与斥力相等。如果把一对相距为  $r_0$  的原子拉开或压紧，必須相应地施加拉力或压力，以克服原子間的引力或斥力。这由施加外力以改变原子間距所作的功，就用来增加原子的位能。在图 1-2 中的下图就表示原子間位能与原子間距离的关系。当  $r=r_0$  时，两原子的位能最低，因而原子处于最稳定状态。 $r_0$  就称为



平衡距离。

对平衡距离  $r_0$  任何的偏离，都会使原子的位能增加，使原子处于不稳定状态，这时原子就有力图恢复低能状态的倾向。例如，用外力拧紧的发条，当外力消除后，就会自动松开，恢复原状，以降低发条的内能。

将上述的双原子模型推广到多原子组成的物体中去，不难理解，为使多原子物体本身具有最低的能量，以保持稳定状态，则大量原子之间必须保持一定的平衡距离。这样，大量原子作有规则的排列，就是固态物体的晶体性。

然而，晶体表面与内部的原子处于不同的能量状态。晶体表面的原子缺乏来自上面的引力，因而受力不能均衡，离开了平衡距离，使表面原子具有较高的能量，这就是所谓表面能。图1-3表示原子在晶体内部和晶体表面的能量状态。

## 2) 晶格与金属晶格主要类型

在晶体中金属原子可以有规则地排列成不同的样式。晶格就是用来表示晶体中原子规则排列的格式(图1-4 a)。在晶格中，每个原子所处的平衡位置叫做结点。组成晶格的单元称为晶胞(图1-4 b)。如果晶胞的各稜边长度相等，并且互相垂直，这种晶胞称为简单立方晶格(晶胞)。

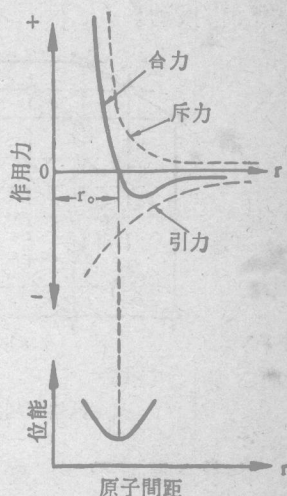


图 1-2 两原子之间的相互作用力及位能与原子间距离的关系

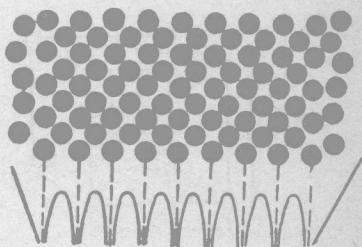


图 1-3 原子在晶体内部和晶体表面的能量状态示意图

必須注意，原子在晶格結点上并不是固定不动，而是围绕結点中心作振动。

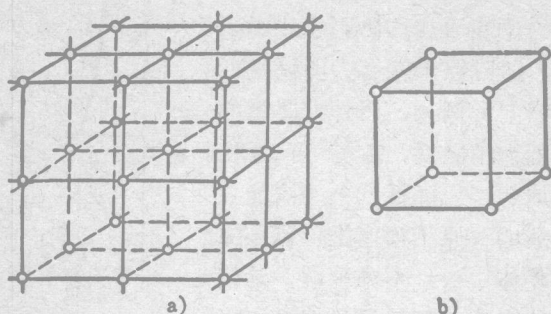


图 1-4 晶格

a—晶格（結晶格子）；b—单位晶格（晶胞）

由于金属原子（正离子）間的結合特点使它們具有趋于最紧密排列的傾向，这就使金属原子在空間排列的样式大为减少。如果把金属原子当作坚实的球体，大多数金属主要有下列三种类型的晶格：

(1) 体心立方晶格 它的特征是在立方晶格八个頂角上和立方体中心处各有一个原子，如图 1-5 所示。属于这一类型的金属有鉻、鈮、鉬、鎢、 $\alpha$  鉄（当低于  $910^{\circ}\text{C}$ ，和  $1400^{\circ}\sim 1535^{\circ}\text{C}$  之間）等。

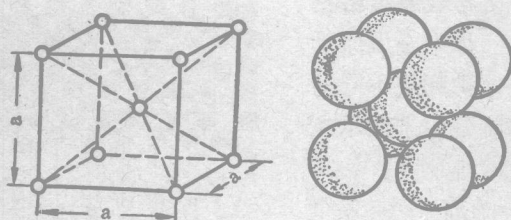


图 1-5 体心立方晶格（晶胞）

(2) 面心立方晶格 它的特征是在立方晶格八个頂角上和立方体六个面的中心处各有一个原子，如图 1-6 所示。属于这一类型的有鋁、銅、鎳、金、銀、 $\gamma$  鉄（在  $910\sim 1400^{\circ}\text{C}$  之間）

等。

(3) 密排六方晶格 它的特征是一个六方柱体，除去上下两面各六个頂角上以及上下两面中心处各有一个原子外，在六方柱体中还有三个原子，如图 1-7 所示。属于这一类型的有鋅、鎂、銅等。

各种元素的晶格类型均在表 1 中载明。

晶格类型相同的金属，其差别表现在晶胞的稜边长度不同。晶胞的稜边长度用晶格常数—— $a$  (对于立方晶格) 和  $a$ 、 $c$  (对于密排六方晶格)

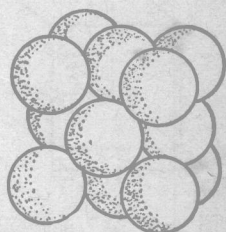
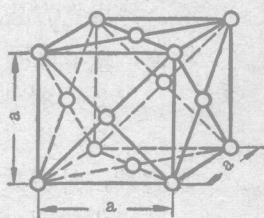


图 1-6 面心立方晶格 (晶胞)

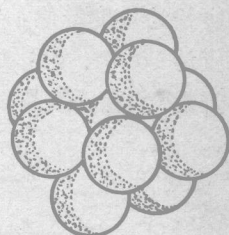
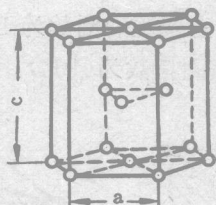


图 1-7 密排六方晶格 (晶胞)

来表示。晶格常数的量度单位是埃 ( $1\text{\AA} = 10^{-8}$  厘米)。在金属晶格中， $a$  和  $c$  的大小为  $2.5 \sim 5.5$  埃。凡在周期表中同属一組且具有同一类型晶格的諸元素，其原子序数愈大者，晶格常数也愈大。

3) 晶面、晶向以及它们的表示方法 在研究各种金属晶格的細节及其性能时，通常都需要分析晶格中各种位向的晶面与晶向中原子分布的特点。所謂晶面，就是晶格中原子所組成的平面；晶向就是晶格中一点到任一点所指的方向。为了便于对各种晶面和晶向中原子分布特点进行分析，有必要給予各种晶面及晶向以一定的符号。晶面的符号叫做“晶面指数”；晶向的符号叫做“晶向指数”。

現以立方晶格为例，按下列步骤来确定晶面指数。

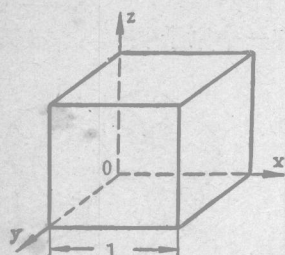


图 1-8 立方晶格的坐标

(1) 以立方晶胞的某一顶点作为空间坐标轴的原点  $0$ ，以相互垂直的三棱边为三坐标轴  $x$ 、 $y$ 、 $z$  (图 1-8)，并用立方晶胞的一棱边长为量度单位，量取晶面在三轴上的截距；

(2) 求出三截距数值的倒数；

(3) 将三倒数化成等比例的简单整数，并将数括在一圆括号之内。

举例说明如下：

图 1-9, a 中的晶面，其晶面指数的求法是：(1) 取立方体棱边长为量度单位 1；(2) 该晶面在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三轴上的截距数相应为 1、 $\infty$ 、 $\infty$ ；(3) 三截距的倒数为 1、0、0 (倒数已为简单整数)。所以该晶面的晶面指数为  $(100)$ 。

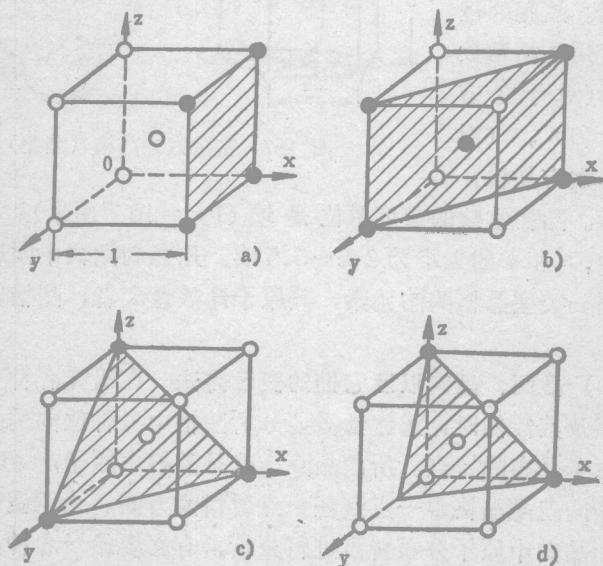


图 1-9 立方晶格中的晶面

a— $(100)$ ；b— $(110)$ ；c— $(111)$ ；d— $(121)$



在图 1-9, b 中的晶面, 在三轴上的截距为 1、1、 $\infty$ , 其倒数各为 1、1、0, 所以晶面指数为 (110)。

在图 1-9, c 中的晶面, 在三轴上的截距为 1、1、1, 其倒数各为 1、1、1, 所以晶面指数为 (111)。

在图 1-9, d 中的晶面, 在三轴上的截距为 1、 $1/2$ 、1, 其倒数各为 1、2、1, 所以晶面指数为 (121)。

确定立方晶格中晶向指数的方法是: 用立方体的一棱边长度为量度单位, 量取某点由坐标原点向一定方向移动时, 在 x、y、z 三轴上的投影; 化截距为三个简单整数, 即为晶向指数。图 1-10 表示各晶向的数值。

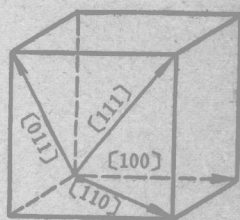


图 1-10 立方晶格的晶向指数

### 3. 单晶体与多晶体

金属经过磨光和腐蚀, 在显微镜下就可看到金属内部是由许多

多颗粒组成的 (图 1-11)。这种外形不规则的晶体称为晶粒; 晶粒与晶粒之间接触的界面称为晶粒间界 (简称为晶界)。晶粒的尺寸一般为  $10^{-2} \sim 2.5 \times 10^{-3}$  厘米。

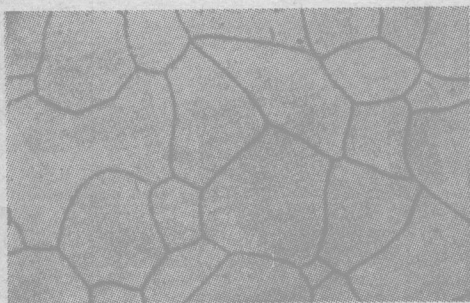


图 1-11 纯金属的显微组织,  $\times 100$

用人工方法能够制

取单晶粒, 其晶格按

相同位向排列的晶体, 称为单晶体。晶体中不同晶面或晶向上的原子间的距离和作用力不同, 因而晶体的性能也不同, 这就是晶体的重要特性之一——各向异性。例如单晶体铜在不同方向作拉伸试验时, 强度极限的变化由 14 到 35 公斤/毫米<sup>2</sup>, 延伸率由 10%