

# 工程材料的 组织与性能

R. M. 布瑞克  
〔美〕 A. W. 彭 斯 著  
R. B. 戈 登

机械工业出版社

#### IV

提供的资料。我们也要对麻萨诸塞工艺学院的 Michael Beuer 表示感谢，感谢他对书稿的审阅以及提出的宝贵意见。最后，我们要对 Dorothy Brick 及 Muriel Pense 在准备本书的第四版时的耐心及谅解表示感激。

Robert M. Brick

Alan W. Pense

Robert B. Gordon

## 译者的话

本书译自 Robert M. Brick 等著《工程材料的组织与性能》(Structure and Properties of Engineering Materials) 1977 年第四版。全书阐述了金属材料的组织结构的基本概念、相图以及金属强化的基本原理;介绍了铜、铝、镁、铍、钛等非铁合金及低碳钢、中碳钢、工具材料、不锈钢、铸铁、高温合金、工程聚合物和陶瓷材料的成分、组织结构、热处理和性能特点。本书注意反映七十年代以来的新材料及新工艺,书末附有常用相图,并简略介绍了近代的金相检验方法、断裂力学和非晶态金属。每章均附有习题,以便读者巩固所学知识。

近年来,除金属材料外,非金属材料在工程中的应用也日益广泛。在我国,高等工科院校中不少专业已经或即将开设有关《工程材料》的课程,本书可供高等工科院校各有关专业作为教学用书或教学参考用书,也可供有关工程技术人员参考。

参加本书翻译的有河北工学院王健安(前言、第 1~第 5 章)、陈松春(第 6~9 章)、史贤彬(第 10~13 章)、蒋正行(第 14~18 章、附录 1~3)。全书经王健安校订。

## 前 言

几十年来, 金属合金一直是工程上采用的主要材料。近来, 在有些方面, 材料的采用有了新的发展, 其他材料如高分子聚合物、陶瓷在性能上、成本上与金属合金几乎相当, 有的甚至更好。目前, 材料的范畴已由金属扩展到包括上述高分子聚合物和陶瓷等。因此, 在工艺技术正在继续发展的时候, 《合金的结构与性能》必须加以修订。我们不仅更新了这本书的内容, 而且扩大了它的范围, 把有关工程高分子聚合物以及陶瓷的新章节包括进来。

通常, 在满足更有效地利用能源这样的现代要求方面, 我们的能力受到某些限制, 而现有材料的性能上的不足, 则是限制我们的能力的主要因素。科学家们能够构思设计出一些装置, 但在经济运行所要求的温度及应力下, 材料却往往不能有效地工作。然而, 发展更好的材料的努力, 必须建立在首先了解我们现有的材料的基础之上。

以前版本中的有关合金的基本原理, 并未由于扩大范围而加以变动。就合金以及陶瓷而言, 了解了相图以及工艺因素的影响, 可以预先估定一系列不同成分的材料组织及有关性能。更重要的是, 有了这些知识, 可以设计出一些好的方法, 可以有控制地改变这些因素, 从而获得更好的经济性及使用功能。至于高分子聚合物, 结构也是决定性能的重要因素。然而, 由于篇幅所限, 本书不能深入研究控制及改进组织的方法, 需要这方面的知识的工程师, 请查阅专门的参考书。

总之, 本书不打算深入研究理论, 而只限于能充分地表明, 就合金而言, 如何能把理论知识应用到与组织有关的性能上去。这些性能依次决定了合金及其他材料在实际问题中的经济性及应用。本书主要讨论对所有工程师都很重要的, 介于理论书籍与实用手册之间的内容。

基于上述理由, 在这一新版本中, 章节内容作了很大的更动。在前六章中, 简要地叙述了物理冶金的基本概念。在叙述了未加合金元素的金属的结构与性能后, 有五章专门讨论金属的基本强化机理, 即固溶强化、形变强化、多相强化、沉淀强化以及马氏体转变强化。然后, 用十章讨论工业中常用的主要非铁合金与铁合金。最后有两章讨论非金属材料, 其中一章讨论工程高分子聚合物, 另一章讨论工程陶瓷。

为了避免在用近代工艺上的进展更新内容及新增加两章时增大本书的篇幅, 对本书的第三版作了很大的删节。根据其重要性来判断, 其中, 有些无疑是应予删去的, 有些则是勉强删去的。但是, 在合金范畴中的许多比较新的进展, 例如定向凝固、连续铸造、激冷(如金属“玻璃”的激冷)、Ti 的  $\alpha$ - $\beta$  结构的控制、低碳钢的焊接、形变热处理、超塑性以及断裂韧性等, 已经包括在本书的内容中。

衷心感谢纽约工业学院 Harold Margolin 教授对新分出的有关钛的章节的校阅。同时, 我们也对提供的下列帮助表示感谢: 纽约工业学院 Yashwant Mehajan 提供的钛组织的显微照片; R. A. Moll 博士提供的碳化物工具的显微组织照片; Los Alamos 科学试验室 R. Wayne Kraft 博士及 T. I. Jones 提供的定向凝固合金的显微照片; Carpenter 工艺公司 D. R. Muzyka 博士对有关高温合金的第 16 章的校阅以及 Los Alamos 的 Reed Elliot 博士对激冷

# 目 录

## 前言

## 第1章 未加合金元素的金属的结构

与性能 ..... 1

- 1-1 金属的晶体结构 ..... 1
- 1-2 晶体、晶粒与晶界 ..... 6
- 1-3 非金属固体的结构 ..... 8
- 1-4 机械性能特征及性能试验 ..... 10
- 1-5 热学性能、电学性能与磁性 ..... 16
- 1-6 未加合金元素的金属的一般性能 ..... 20

## 第2章 强化机理；固溶强化 ..... 27

- 2-1 固溶体的形成条件 ..... 27
- 2-2 凝固机理 ..... 28
- 2-3 纯金属的凝固 ..... 30
- 2-4 Cu-Ni 相图 ..... 32
- 2-5 铸造 Cu-Ni 合金中的偏析 ..... 34
- 2-6 扩散 ..... 37
- 2-7 固溶体的性能 ..... 39
- 2-8 有序固溶体 ..... 42

## 第3章 强化机理；形变强化与退火 ..... 44

- 3-1 金属的塑性 ..... 44
- 3-2 冷压力加工引起的性能变化 ..... 49
- 3-3 退火 ..... 51
- 3-4 退火时的性能变化 ..... 56
- 3-5 热加工 ..... 57
- 3-6 择优位向及方向性性能 ..... 57

## 第4章 强化机理；多相共晶组织 ..... 60

- 4-1 Pb-Sb 共晶相图 ..... 60
- 4-2 Al-Si 共晶及 Al-Mg 共晶 ..... 61
- 4-3 多元共晶 ..... 62
- 4-4 共晶组织 ..... 63
- 4-5 共晶系合金的特性 ..... 68

## 第5章 强化机理；沉淀硬化 ..... 70

- 5-1 硬化的一般机理 ..... 70
- 5-2 固溶体中的沉淀 ..... 71
- 5-3 Al-Cu 合金的时效硬化 ..... 72
- 5-4 影响 Al-Cu 时效硬化特性的变量 ..... 76
- 5-5 可时效硬化的 Cu-Be 合金 ..... 78

## 第6章 强化机理；铁碳合金的马

氏体转变 ..... 81

- 6-1 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图 ..... 81
- 6-2 铁碳合金 ..... 82
- 6-3 未经淬火钢的显微组织 ..... 85
- 6-4 钢的热处理原理 ..... 88
- 6-5 马氏体的形成 ..... 90
- 6-6 非共析钢的转变 ..... 93
- 6-7 相变时的热效应、体积变化  
以及有关应力 ..... 96
- 6-8 马氏体的回火 ..... 97
- 6-9 等温转变后钢的显微组织 ..... 98
- 6-10 铁素体-碳化物混合组织的性能 ..... 104

## 第7章 铜和铜合金 ..... 107

- 7-1 未加合金元素的铜 ..... 107
- 7-2 黄铜，Cu-Zn 合金 ..... 109
- 7-3 锻造黄铜的性能 ..... 115
- 7-4 锡青铜，Cu-Sn 合金系 ..... 116
- 7-5 硅青铜和铝青铜 ..... 117
- 7-6 铸造铜基合金 ..... 118

## 第8章 铝合金 ..... 121

- 8-1 铝合金系 ..... 121
- 8-2 可加工硬化的锻造合金 ..... 122
- 8-3 可热处理的铝合金 ..... 124
- 8-4 铸造铝合金的问题及性能 ..... 126
- 8-5 铸造合金的显微组织 ..... 129
- 8-6 残留应力和应力松弛 ..... 133

## 第9章 镁和铍 ..... 136

- 9-1 镁的基本的合金化特性 ..... 136
- 9-2 镁合金及其相图 ..... 137
- 9-3 镁合金的显微组织 ..... 139
- 9-4 砂型铸造镁合金的性能 ..... 143
- 9-5 锻造镁合金的性能 ..... 147
- 9-6 镁合金的一般特性 ..... 148
- 9-7 铍及其性能 ..... 149

## 第10章 钛和锆；钛合金 ..... 153

- 10-1 纯钛的特性 ..... 153

|                           |     |                           |     |
|---------------------------|-----|---------------------------|-----|
| 10-2 钛合金的相图 .....         | 155 | 15-3 固态石墨化; 可锻铸铁 .....    | 236 |
| 10-3 钛合金的热处理 .....        | 158 | 15-4 球墨铸铁 .....           | 238 |
| 10-4 钛合金的显微组织 .....       | 160 | 15-5 显微组织 .....           | 238 |
| 10-5 钛合金的性能 .....         | 161 | 15-6 铸铁的性能 .....          | 239 |
| 10-6 钛的生产工艺及应用 .....      | 163 | 第16章 高温合金 .....           | 246 |
| 10-7 超塑性及钛合金的超塑成形 .....   | 164 | 16-1 耐热金属在高温下的基本性能 .....  | 246 |
| 第11章 钢铁合金: 低碳钢 .....      | 166 | 16-2 镍基和铁-镍基耐热合金 .....    | 249 |
| 11-1 典型的炼钢方法 .....        | 166 | 16-3 钴基耐热合金 .....         | 252 |
| 11-2 钢的连续浇铸 .....         | 167 | 16-4 VB族金属: 钒、铌及钽 .....   | 255 |
| 11-3 钢的晶粒度 .....          | 169 | 16-5 VI B族金属: 铬、钼及钨 ..... | 258 |
| 11-4 不经热处理强化的钢 .....      | 170 | 16-6 耐热金属的表面涂层 .....      | 261 |
| 11-5 低合金高强度钢 .....        | 175 | 第17章 工程聚合物 .....          | 263 |
| 11-6 低碳钢的熔焊 .....         | 177 | 17-1 聚合物的结合键及结构 .....     | 263 |
| 11-7 低碳钢的渗碳 .....         | 178 | 17-2 聚合物的一般机械性能 .....     | 268 |
| 第12章 钢铁合金: 中碳钢 .....      | 182 | 17-3 烯烃、乙烯及有关的聚合物 .....   | 270 |
| 12-1 中碳钢的命名方法 .....       | 182 | 17-4 杂链热塑性塑料 .....        | 273 |
| 12-2 淬透性 .....            | 184 | 17-5 热固性聚合物 .....         | 276 |
| 12-3 可硬化的碳钢 .....         | 186 | 17-6 合成橡胶 .....           | 277 |
| 12-4 可硬化的合金钢 .....        | 187 | 第18章 工程陶瓷 .....           | 279 |
| 12-5 等温淬火及分级淬火 .....      | 191 | 18-1 粘土和粘土制品 .....        | 279 |
| 12-6 超高强度钢 .....          | 192 | 18-2 晶体陶瓷 .....           | 281 |
| 12-7 钢的特殊处理 .....         | 195 | 18-3 玻璃 .....             | 283 |
| 第13章 工具材料 .....           | 198 | 附录1 金相学 .....             | 289 |
| 13-1 工具钢的分类 .....         | 198 | A 1-1 试样的制备 .....         | 289 |
| 13-2 高速钢的相图 .....         | 199 | A 1-2 定量金相学 .....         | 290 |
| 13-3 工具钢的等温转变曲线及其应用 ..... | 201 | A 1-3 电子显微镜 .....         | 290 |
| 13-4 工具钢的回火 .....         | 204 | A 1-4 电子探针 .....          | 291 |
| 13-5 显微组织 .....           | 207 | 附录2 材料的失效 .....           | 292 |
| 13-6 工具钢热处理的几个问题 .....    | 208 | A 2-1 断裂类型 .....          | 292 |
| 13-7 热处理时的尺寸变化 .....      | 214 | A 2-2 脆性断裂机理 .....        | 293 |
| 13-8 硬质合金及其他工具材料 .....    | 215 | A 2-3 脆性断裂的抑制 .....       | 294 |
| 13-9 工具钢的选择 .....         | 217 | A 2-4 线弹性断裂力学 .....       | 296 |
| 第14章 钢铁合金: 不锈钢 .....      | 219 | A 2-5 韧性断裂机理 .....        | 297 |
| 14-1 不锈钢的相图 .....         | 219 | A 2-6 蠕变失效 .....          | 297 |
| 14-2 不锈钢的分类 .....         | 221 | A 2-7 疲劳失效 .....          | 299 |
| 14-3 显微组织 .....           | 222 | A 2-8 非破坏检查 .....         | 300 |
| 14-4 不锈钢的热处理 .....        | 223 | 附录3 急冷及金属玻璃 .....         | 301 |
| 14-5 不锈钢的机械性能 .....       | 226 | 附录4 相图 .....              | 302 |
| 14-6 不锈钢的腐蚀抗力 .....       | 229 | 化学元素周期表 .....             | 320 |
| 第15章 铸铁 .....             | 232 |                           |     |
| 15-1 Fe-C-Si 相图 .....     | 232 |                           |     |
| 15-2 灰铸铁凝固时的石墨化 .....     | 233 |                           |     |

⊖ 原书为 V A ——译注

⊙ 原书为 VI A ——译注

## 第 1 章 未加合金元素的金属的结构与性能

某一特定元素是否是一种金属取决于它的某些性能。然而，对于用哪种或哪几种性能作为决定其是否是金属的标准，却没有一致的意见。对化学家来说，如果某种元素的氧化物溶于水后形成碱性溶液，则这种元素为金属；对物理学家来说，如果某种元素具有良好的导电性，而且导电性随温度的升高而减小，则这种元素为金属。由于冶金学家主要关心材料的机械、电、磁性能，所以对他们来说，如果某种元素能满足物理学家的性能要求，并且能进行某种程度的塑性变形，则被认为是金属。实际上，冶金学家的主要工作就是研究如何通过控制金属的成分和组织，从而改变或改进这些金属性能。在结构上及其它用途方面，工程师掌握金属性能可以改变的程度，比单纯依靠手册能更巧妙地利用金属及合金。

由于金属从来不是绝对纯的，纯度的变化由某些电解及区域精炼金属的 99.999%，到没有进行过价昂费时的精炼过程的金属的 98.0% 或更低。在本书中，不采用“纯金属”而采用“未加合金元素的金属”这一术语。在本章中，我们将讨论没有故意加入合金元素的工业纯的金属。但是，也提到了在许多方面的应用中可以代替金属的、近十年来日益重要的某些非金属材料。

### 1-1 金属的晶体结构

由于金属具有比较高的密度，它们必然是由紧密堆集在一起的原子所组成的。首先，可以假想金属原子是坚硬的圆球，在所有方向上都有吸引力。如果有一些这样的坚硬圆球，为了达到紧密堆集即占有最小的体积，这些原子应该如何排列？我们先研究最简单的二维的情况。当这些原子充填在象蜂巢一样的六角模型中时，它们占有的面积最小。这种模型如图 1-1 所示，它表示了在平板上圆球可能有的最密堆集。要使三维排列的圆球占有最小体积，必须将第二层原子的中心排列在第一层原子间的空隙中。在图 1-2 中，第二层原子的中心的位置用符号  $\times$  表示，应该注意到第一层原子的空隙只有一半被第二层原子占据。其他没有用  $\times$  标示的空隙同样可以作为第二层原子的中心位置。在这两种情况下，这种两层的原子结构

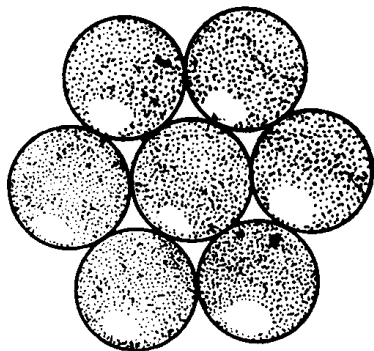


图 1-1 大小相同的圆球，在平面上占有最小面积的堆集方式

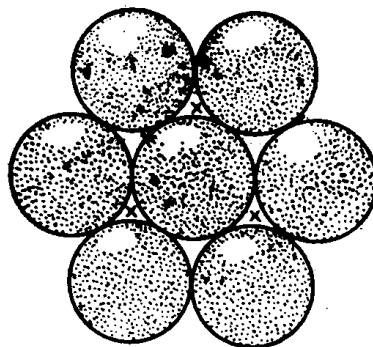


图 1-2 第二层的原子中心位于图 1-1 所示原子层的带有  $\times$  的位置上

都是相同的。

到现在为止，这种利用堆集刚球而构成的金属结构还只有两层原子的厚度。由于存在两种不同的加入方式，在加入第三层原子时将引起一些问题。一种方式是将第三层原子中心放在第一层中没有标示×的空隙上。为了说明这种结构，令第一层原子为A，中心位于标示×的位置上的第二层原子为B，中心位于A未标示×的空隙上的第三层原子为C。这样形成的密排层的堆集顺序为ABC。在这种三层原子的堆集过程中，密排层的所有可能选用的位置均已占用，而第四层原子则可再加入到A的位置上。依此类推，按ABCABCA…这样的顺序可以增大到所需的任意厚度。这就是尽可能紧密堆集的三维的圆球排列。图1-3即为这种结构的平面图。

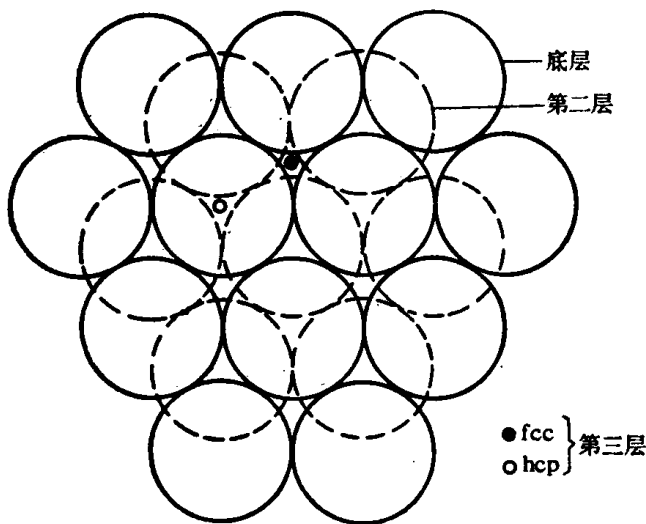


图1-3 实线圆表示底层原子，虚线圆表示位于第一层上方的第二层原子。对于密排结构，第三层原子可以位于黑点的位置（C层）或白点的位置（另一A层）

还有第二种堆集方式，能使图1-1的密排层堆集成密排晶体。开始两层按图1-2所示堆集，而第三层则加入到与第一层相同的位置上。与上述第一种堆集方式相同，这种结构显然也是密排结构，但其堆集顺序为ABABA…。许多金属不是具有ABCABCA…就是具有ABABA…的密排结构。有些金属具有更复杂的结构，这将在以后讨论。

对于很多用途来说，认为密排结构是按上述方式由密排层堆集而成的这种看法是比较方便的。有时在堆集原子中选出一部分原子，然后描述这部分原子的排列情况则比较方便。为此目的选出的原子群称为结构的晶胞。在一些同样正确的表示晶胞的方式中，人们可以自由选用一种，但经验表明，对于每一种结构都有一个最易看清、能最好地表示原子排列的对称性的晶胞。对于ABCABCA…型的密排结构，组成晶胞的原子群如图1-4(b)所示。在图1-4(b)中，密排层处于倾斜位置。图1-4(a)示意地表示在这种结构中原子的位置。从图1-4(a)可以看出，原子排列成立方对称。

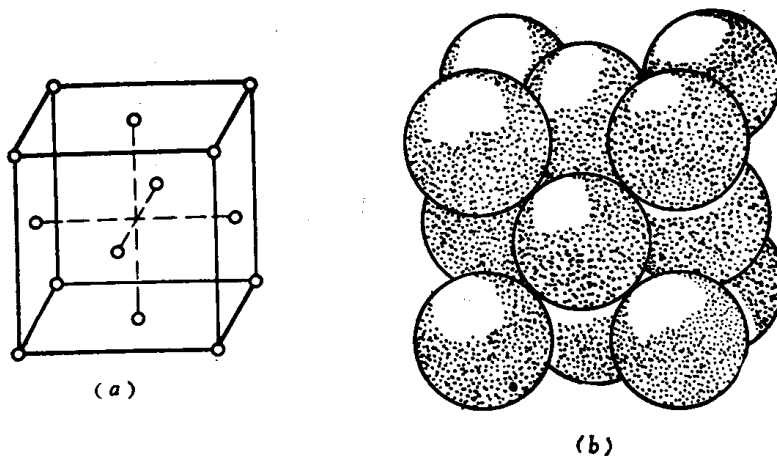


图 1-4

(a) fcc结构晶胞中的原子中心的位置 (b) fcc结构晶胞中每个位于面中心的原子与最邻近的、位于角上的原子以及位于其前面和后面的面心原子相接触，共有12个最邻近原子。晶胞中含有4个原子（每个面心原子的 $\frac{1}{2}$

加上每个位于角上的原子的 $\frac{1}{8}$ ）



根据晶胞中的原子排列, ABCABCA...型密排结构称之为面心立方结构 (fcc)。典型的 fcc 结构有铝、铜和镍。

ABABA...型结构的组成晶胞的原子群如图 1-5(b)所示。在这种结构中,很容易看出密排面为水平面。由图 1-5(a)可以看出,原子的排列为六角对称。这种结构称之为密排六方 (hcp)。镁和锌即为密排六方结构金属。

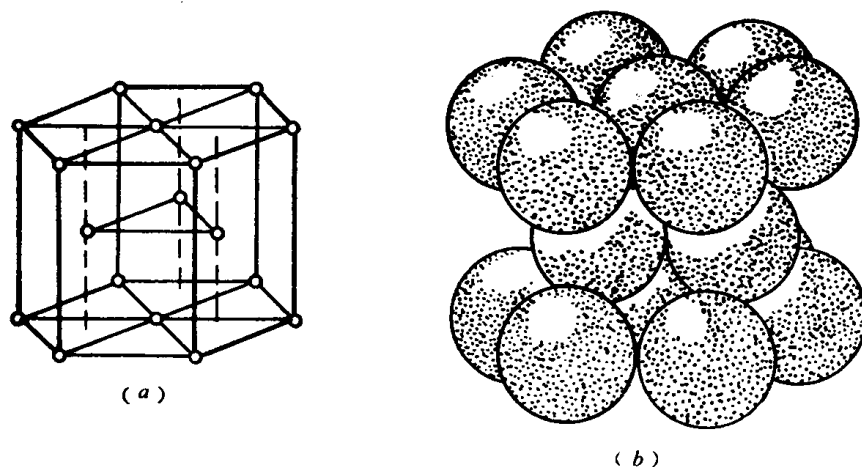


图 1-5

(a) hcp 结构晶胞中的原子中心的位置 (b) hcp 结构晶胞中的原子  
与 fcc 结构相同, 每个原子有 12 个最邻近的原子, 6 个在同一平面上, 3 个在下层平面上, 3 个在上层平面上

如果金属原子为坚硬的刚球、在各方向都具有相同的吸引力这一假设在所有情况下都适用的话, 则可以期望所有金属将具有或者是 fcc 或者是 hcp 结构。然而, 根据化学可知, 有许多原子对于其他原子的吸引力并不是在各个方向都相等的, 而是倾向于优先在某些方向形成键合。有些金属原子也具有这种特性, 因而组成的结构不是密排的。一种称之为体心立方 (bcc)、稍为偏离密排结构的结构示于图 1-6。许多重要的金属如铁、铬、钨具有 bcc 结构。

有一些金属的结构更显著地偏离密排结构。铋、锑、镓不是具有立方对称, 而是具有菱形对称的原子结构。这些金属具有所谓的敞形结构, 表明在看作是刚球的每个原子的周围都有相当的空着的空间。与此有关, 这些金属在熔化时体积将减小, 而大多数金属在液态时则具有比固态时更大的比容。

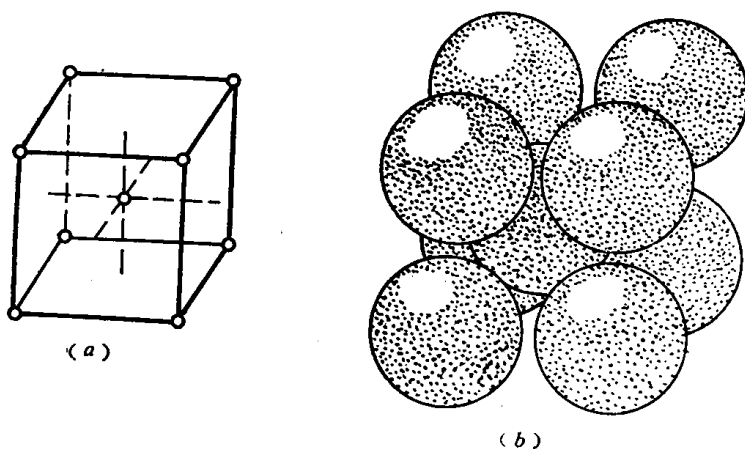


图 1-6

(a) bcc 结构晶胞中的原子中心的位置 (b) 中心的原子与每个角上的原子相接触, 角上的原子彼此不接触。晶胞中有 2 个原子 (一个中心原子加

每个角上的原子的  $\frac{1}{8}$ )。每个原子有 8 个最邻近的原子

### 晶格常数

晶格常常用以表示晶体结构。晶格是点在空间的有规律的重复排列。如果使点位于 fcc 结构的每个原子的中心，则这样形成的点的排列即为 fcc 晶格。根据同样的方法，也能形成 bcc 及 hcp 晶格。

晶格常数，即其晶胞的大小，是金属的一种重要的特性。对于具有立方对称的金属，如给出立方晶胞的边长，则晶胞的大小即可确定。因此，立方金属只有一个晶格常数。观察通过金属的 X 线的衍射，可以测量出金属的晶格常数。测量出的晶格常数的单位以埃 (Å) 表示， $1 \text{ Å} = 10^{-8} \text{ cm}$ 。立方金属的晶格常数的典型数值为 Al 4.04 Å 及 Mo 3.14 Å。

如果晶胞不是立方对称，则必然具有一个以上的晶格常数。对于六方结构，晶格常数有两个，一个是密排面（有时称之为基面）中的相邻结点的距离  $a$ ，另一个是晶胞顶面至底面的距离  $c$ 。如某一六方晶格金属是真正密排的，是由球状原子按 ABABA... 堆集而成的，则  $a$  与  $c$  间必须保持一定的比例。实际上， $\frac{c}{a} = \left(\frac{8}{3}\right)^{1/2} = 1.633$  这一比例即表示结构为完全密排。在大多数结晶成六方结构的金属中，原子间的作用力常常导致其结构稍为偏离完全密排。在锌中，这种偏离很大，轴比  $\frac{c}{a}$  为 1.85。

### 密度

如果已知某种金属的晶格常数以及其单个原子的质量（由质量分光计测出，或由原子量除以阿伏伽德罗常数算出），则可很容易地算出其密度。进行这种计算时，首先要算出在一个晶胞的体积中的原子数。对于简单的结构，这个原子数可以通过观察来确定，此时，只需假想晶胞被稍为移出，从而使晶胞包括着所有的结点，然后计算晶胞内的原子数。另一种不必使观察者进行过多的三维观察的方法，则如下例所示。对于 bcc 晶胞，每个位于棱角上的原子为八个晶胞所共有，故晶胞中的原子数为

$$\text{一个中心原子} + 8 \times \frac{1}{8} \text{ 棱角原子} = 2 \text{ 个原子/每个晶胞}$$

同理可知，对于 fcc 晶胞，为

$$6 \times \frac{1}{2} \text{ 面心原子} + 8 \times \frac{1}{8} \text{ 棱角原子} = 4 \text{ 个原子/每个晶胞}$$

为了计算晶体的密度，必须算出晶胞中全部原子的质量，然后除以晶胞的体积。例如，结构为 bcc 的铁，由于其原子量为 55.85，晶格常数为  $2.8610 \text{ Å}$ ，故其密度可由下式算出：

$$\frac{2 \times 55.85}{6.025 \times 10^{23}} (2.8610 \times 10^{-8})^3 = \text{铁的密度, g/cm}^3$$

这样计算得到的密度是具有理想晶体的铁的密度。由于晶体中存在着诸如空位之类的晶体缺陷，实际测量出来的晶体密度将低于计算值。因此，密度的测量也可用以作为晶体完整性的度量。

### 原子尺寸

如果金属原子可以被认为是坚硬刚球，则可认为其具有一定的直径。若某一金属的晶体结构及晶格常数为已知，则可算出其原子直径。晶体结构中的原子在某些方向上相接，这些方向称之为密排方向。例如，由图 1-4 可以看出，fcc 结构中的密排方向是立方体面的对角线方向。如晶格常数为  $a$ ，则对角线的长度为  $a\sqrt{2}$ ，而原子直径为  $\frac{1}{2} a\sqrt{2}$ 。

金属原子的坚硬刚球模型只是一种近似。实际上，常常发现某一金属的原子可能具有不同的直径。例如，在纯铁金属中，铁原子的原子直径为某一数值；在铁-镍合金中，则为一个稍微不同的数值；而在氯化铁晶体中，又为另一个数值。然而，已经证明原子直径是冶金学中的一个有用的概念，这一概念在了解合金的形成中将起重要作用。

沿晶体密排方向的、邻近某一原子的原子，称为该原子的最邻近原子。如图1-4所示，fcc结构中的每个原子的最邻近原子为12个。在hcp结构中，每个原子也有12个最邻近原子。而在bcc结构中，每个原子只有8个最邻近原子。给定结构中的最邻近原子数，称为该结构的配位数。因此bcc结构的铁的配位数为8，而铜的配位数为12。

### 晶面与晶轴

晶格中的结点表示出晶面的排列。有些晶面是容易看出的。例如，那些标示出(如图1-4及图1-6所示的)fcc及bcc晶格的晶胞的面，构成一组晶面，称之为立方体面。每个立方体面均在晶格中无限地重复排列，在简单立方结构中，它们是一系列距离为晶格常数的平行面，而在fcc和bcc结构中，面间距则为晶格常数的一半。某些其他的重要晶面示于图1-7中。每组晶面都有自己的特殊的面间距。

由于某一给定类型的晶面在晶格中或多或少是无限重复的。因此，某一特殊晶面的位置在晶体学中没有多大意义。然而，每个晶面或每组晶面相对于晶胞棱边的位向则是重要的。为了说明晶面位向，采用下述方法较为方便，即从该结构的一个晶胞中选出一组棱边作为一组晶轴。对于fcc及bcc结构，晶轴为一组直角坐标轴。晶面在这些坐标轴上的截距可以采用厘米或埃为单位，但在晶体学中，采用晶格常数作为晶轴上的测量单位，已被证明更为有用。因而，不同晶体中的具有相同位向的晶面，即使晶体晶格常数不同，也将具有相同的截距。

为了适应所有的不同的晶格类型，需要有六种不同类型的晶轴。六组不同的晶轴如表1-1所示。

### 同素异晶体

有些金属具有一种以上的结构形式。铁在910°C和910°C以下为bcc结构，而在910°C时，它将进行同素异晶转变，转变为fcc结构。在1400°C以上，fcc相是稳定的，在1400°C，铁又转变成bcc结构，然后保持到熔点。一种金属的不同的结构形式称为同素异晶体。许多金属如铝和铜只有一种结构，但也有许多金属，特别是周期表中的过渡元素，具有两个或两个以上的同素异晶体。

同素异晶转变的发生是由于在某一温度范围内，有一种结构比其他结构更稳定。业已发现，进行同素异晶转变的金属的不同结构间的能量差是很小的。因此，原子力的微小变化就

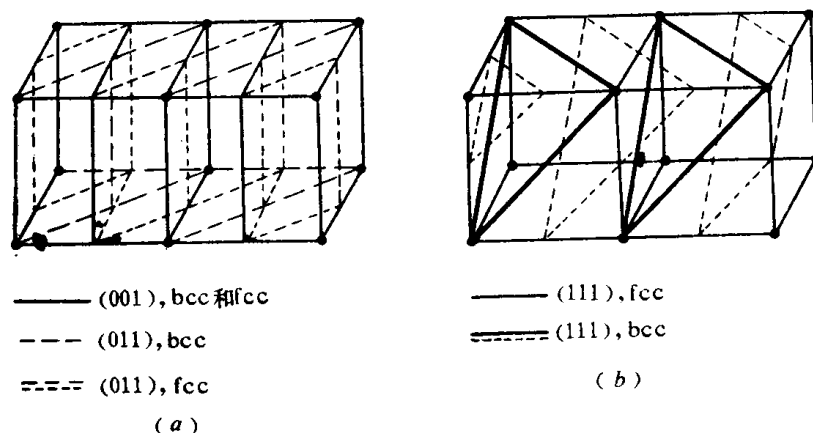


图1-7 两个立方晶格晶胞，只标出棱角上的原子  
(a)对于bcc及fcc结构，两者的立方体面(001)的面间距相同。至于十二面体面(011)的面间距，则必需考虑所有的原子，而bcc结构的面间距等于fcc结构的两倍 (b)fcc结构的八面体面(111)的面间距等于bcc结构的两倍

表1-1 六种晶系

| 名 称 | 晶 轴               |                                                 |
|-----|-------------------|-------------------------------------------------|
|     | 单 位 向 量 的 长 度     | 晶 轴 角                                           |
| 立 方 | $a = b = c$       | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$            |
| 正 方 | $a = b \neq c$    | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$            |
| 六 方 | $a = b \neq c$    | $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ |
| 正 交 | $a \neq b \neq c$ | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$            |
| 单 斜 | $a \neq b \neq c$ | $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$         |
| 三 斜 | $a \neq b \neq c$ | $\alpha \neq \beta \neq \gamma$                 |

能使金属从一种结构转变为另一种结构。也已发现，在很多情况下，同素异晶转变是由于原子间磁的相互作用，但在大多数情况下，对于这些力量的情况，理论学者还未能达到充分了解。

## 1-2 晶体、晶粒与晶界

金属基本上总是结晶的，不存在作为“分子”的固体金属。金属晶体的晶胞可以在三维方向上重复排列(有时具有缺陷)，大小为  $10^3$  到  $10^8$  原子直径。例如，一根包括有  $10^{25}$  个原子的  $1 \times 8$  吋金属棒，可以制造成单晶体。然而，大多数金属还是多晶体，即由许多典型尺寸为 0.1 到 0.01mm 直径的晶体组成。除相对于某一外界参考系的晶轴位向外，多晶体纯金属中的每个晶体是相同的。它们被称为晶粒，它们的平均直径称为晶粒度。每个晶粒与其他相邻晶粒以原子相接触，其间一般没有空位，见照片 1-1。

当两个相对于外界参考系具有不同位向的晶粒互相接触时，显然，在界面处，原子不可能与两个晶粒的晶格完全匹配。在两个晶粒之间必须有一过渡层，过渡层的结构既不属于这一晶粒也不属于另一晶粒。由于相对于每个晶粒来看，过渡层的原子都不处于正常的位置，因而可以预期，与附近的晶粒相比，晶界将具有更高的能量。因此，在受到化学浸蚀溶液作用后，晶界将比周围的物质溶解得更快些，因而在浸蚀后的显微组织中，呈现出在其他较平的表面之间的凹沟。甚至，即使所用的浸蚀溶液并不是使不同位向的晶粒着上不同的颜色，显微组织中的晶界也将呈现为黑色线条。

目前可以得到的事实业已表明，晶界中的具有不规则结构的过渡层只有几个原子层厚。



照片1-1 0.5 $\mu$ m厚真空沉积铝膜的透射电子显微镜照片  $\times 26000$

由于具有不同的位向，电子衍射的数量不同，因而晶粒显示出不同的暗影。晶粒内的胞状网是位错亚晶界 (J. J. Byrnes)

因此，完全可以想象晶界为一平面界面，并以每单位面积具有多少能量来表示。晶界能量的试验测量表明，只要两个晶粒间的角度位向差大于  $10^\circ$ ，则晶界能量似乎为常数，而与晶粒的位向差以及晶界的位向无关。而且，统计表明，在多晶体物质中，很少出现位向差小于  $10^\circ$  的晶界。因此，可以近似地认为，晶界每单位面积具有的能量为一常数。晶界能量通常用每平方厘米尔格或每厘米达因表示。而且，可以认为，晶界与液-汽界面一样，都具有表面张力。在多晶体物质中，这种表面张力正是决定平衡的（完全退火的）晶粒形状的主要因素。

如有三条晶界相遇，则三个晶粒的表面张力必须组成一个平衡的力学系统。由于三条晶界具有相同的单位面积能量，即相同的表面张力。因此，如图 1-8 所示，它们将在互相形成相同的  $120^\circ$  角处相遇。如果只有两条晶界相遇，显然，它们只能在一条直线上。又因为很少出现四条晶界相交，所以在多晶体

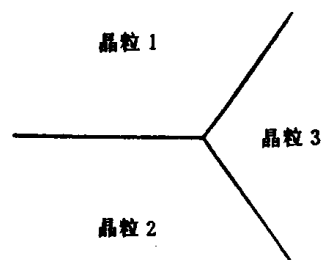


图1-8 三条晶界互成  $120^\circ$  角

物质中，大多数晶界的相交都是如图 1-8 所示的形式。那么，将形成什么形状的晶粒？要回答这个问题，必须找出这样一种多面体，这种多面体的面以  $120^\circ$  相遇，棱边以  $109^\circ 28'$  相遇（四条线在一点对称相交，其中一对线所形成的角），而且能与其他相同的多面体堆集在一起，从而完全充满空间。十四面体能满足上述要求，十四面体的堆集群示于图 1-9，可以预料，在理想状态下，多晶体金属的晶粒将具有类似的形状。在这种情况下，所谓理想状态，是指晶界有机会移动到稳定的位置。纯金属的晶粒形状常常近似于图 1-9 中的理想形状。观察晶粒形状的最好方法之一，是采用下述试验。将一滴液态镓滴在一块粗晶粒的铝块表面，然后用尖头工具在镓下面的铝块上划痕。几分钟后，液态镓将渗入铝的晶界，因而可以从铝中分离出个别的晶粒。这些晶粒将是具有如图 1-9 所示形状的多面体。

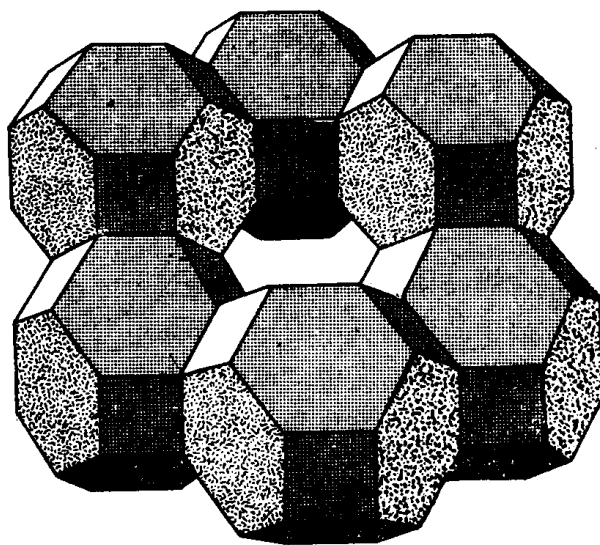


图1-9 十四面体的堆集群，表明具有这种形状的金属晶粒如何能完全充满空间。这种多面体可以减小高能量晶界线，即三条晶界线在互相形成大约  $120^\circ$  处相遇，同时也能减少接合点，从而只有四条晶界在一点相遇，互相形成的角度，接近于具有最低能量状态的  $109^\circ$

具有理想形状的晶粒的金属，其显微截面不会显示出在上面讨论中所预料的规律性。这是因为截面是以任意方向截过多面体的堆集群，切过一些晶粒的大部分，切过另一些晶粒的小部分。然而，照片 1-1 已显示得很清楚，几乎所有的晶界交点都正好包括三条晶界。

除晶粒形状外，试样的晶粒度也常常是重要的。晶粒度可以从大到足以用肉眼观察，一直小到只能用最高分辨能力的光学显微镜才能分辨。在已知放大倍数的显微组织中计算单位面积中的晶粒数，可以求出其晶粒度。ASTM（美国材料试验学会）晶粒度号  $N$  是这样规定的，即  $2^{N-1}$  等于在线放大倍数为 100 时，每平方吋中的晶粒数。表 1-2 中列出了 ASTM 晶粒度号  $N$  与有时采用的其它晶粒度的度量方法的比较。ASTM 已建立一些标准的晶粒度比较图，

从而在显微镜下直接观察时，可以迅速地求出晶粒度。

表1-2 晶粒度的比较

| ASTM<br>晶粒度号 | 晶粒数/英寸 <sup>2</sup> 在<br>放大100倍下① | 晶粒数/毫米 <sup>2</sup> | 晶粒平均直径<br>毫米 | ASTM<br>晶粒度号 | 晶粒数/英寸 <sup>2</sup> 在<br>放大100倍下① | 晶粒数/毫米 <sup>2</sup> | 晶粒平均直径<br>毫米 |
|--------------|-----------------------------------|---------------------|--------------|--------------|-----------------------------------|---------------------|--------------|
| - 3          | 0.06                              | 1                   | 1.00         | 5            | 16                                | 256                 | 0.062        |
| - 2          | 0.12                              | 2                   | 0.75         | 6            | 32                                | 512                 | 0.044        |
| - 1          | 0.25                              | 4                   | 0.50         | 7            | 64                                | 1024                | 0.032        |
| 0            | 0.5                               | 8                   | 0.35         | 8            | 128                               | 2048                | 0.022        |
| 1            | 1                                 | 16                  | 0.25         | 9            | 256                               | 4096                | 0.016        |
| 2            | 2                                 | 32                  | 0.18         | 10           | 512                               | 8200                | 0.011        |
| 3            | 4                                 | 64                  | 0.125        | 11           | 1024                              | 16400               | 0.008        |
| 4            | 8                                 | 128                 | 0.091        | 12           | 2048                              | 32800               | 0.006        |

① 放大倍数为50时，降低两个ASTM晶粒度号；放大倍数为200时，增加两个ASTM晶粒度号。

### 1-3 非金属固体的结构

与从各种矿物中发现的大多数结构相比，上面讨论的普通金属的晶体结构是非常简单的。某些典型的非金属晶体的结构叙述如下。

在叙述物质的结构时，可以采用一些不同的物质的分类标准。例如，在矿物学中，经常按化学成分分类，晶体按它们是否是元素、氧化物、硫化物、硅酸盐等排列。这里，将按作用于晶体中原子间的键合力的类型分类。根据这种分类方法，一般认为有四类主要晶体。它们是：

1. 金属晶体，已在前面讨论过。
2. 离子晶体，其中的原子间作用力是带电子子间的作用力，如  $\text{Na}^+$  与  $\text{Cl}^-$ 。
3. 共价晶体，其中，原子是由化学共价键结合在一起的。
4. 分子晶体，是化学上饱和的分子组成的晶体，由范德华 (Van der Waals) 键结合在一起。

后三类中的一些代表性的例子叙述如下。

#### 离子晶体

最常见的离子晶体结构是氯化钠晶体结构 (图 1-10)。这种结构基本上是 fcc 晶格，但与大多数金属不同，在每一个晶格结点上不是有一个原子，而是有两个原子，一个的中心位于结点上，另一个位于沿 fcc 晶胞棱边距离为  $\frac{1}{2}a$  处。这样，“原子”实际上是离子，在一个晶格结点上有一对离子，一个是  $\text{Na}^+$ ，一个是  $\text{Cl}^-$ 。由于不同的电荷的吸引，每个正离子周围有六个最邻近的负离子，反之，每个负离子也有六个最邻近的正离子。

另一个简单的离子晶体结构是氯化铯的结构 (图 1-11)。这种结构来源于简单立方晶格，在晶格结点上有一种离子，而在晶胞的体对角线的  $\frac{1}{2}$  处则为另一种离子。因此，一种离子

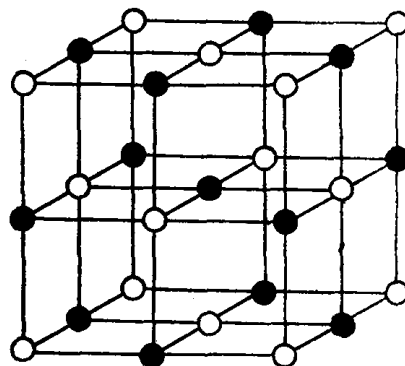


图1-10 岩盐，固体  $\text{NaCl}$  的晶体结构。其密排方向为立方体的棱边而不是面对角线

的周围有八个异号的离子。

可以看出, 在  $\text{NaCl}$  及  $\text{CsCl}$  结构中, 不存在单个的盐分子, 整个晶体可以认为是一个巨大的分子。在某些离子晶体中, 存在较大的形成分子的倾向。在黄铁矿中 (图 1-12), 在 fcc 晶格的结点上实际上是  $\text{FeS}_2$  分子。

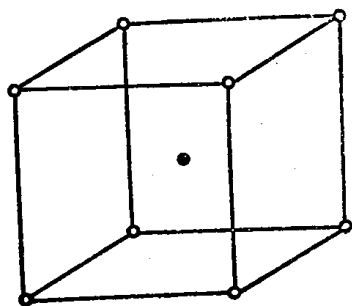


图1-11 氯化铯 $\text{CsCl}$ 的晶体结构。白点为Cs离子, 黑点为Cl离子, 反之亦可

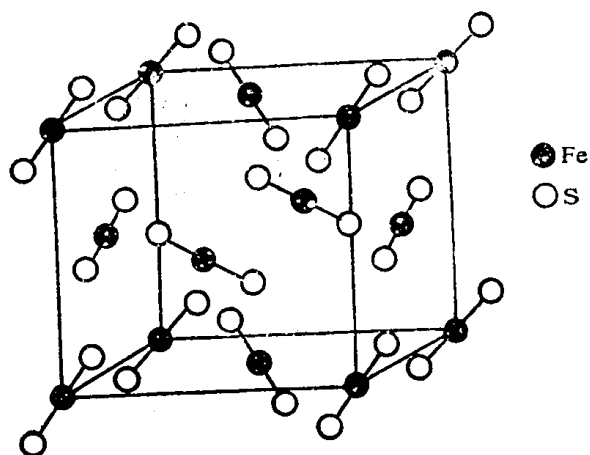


图1-12 黄铁矿 $\text{FeS}_2$ 的结构

### 共价晶体

金刚石 (图 1-13) 是一种典型的共价晶体 (电子共有)。由图 1-13 可以看出, 它基本上是 fcc 晶格。图中原子间的连线表示共价键, 与  $\text{CH}_4$  分子相同, 每个碳原子有四个共价键。除金刚石外, 元素硅、锗和锡的一种同素异晶体具有这种金刚石立方结构。共价键网扩展到整个结构中, 从而使这些元素具有高的硬度。

硅酸盐代表一组非常重要、非常庞大的共价晶体。组成这些晶体结构的基本单位, 是如图 1-14 所示的、一个硅原子和四个氧原子形成的四面体排列。由于这些  $\text{SiO}_4^{4-}$  四面体可以采用许多不同的方法, 互相以及与各种正离子连接在一起。因此, 可能存在许多形形色色的不同的硅酸盐结构。如图 1-15 所示, 它们是比较复杂的。硅酸盐矿物构成地壳的绝大部分, 因而地质学家及矿物学家对它们也有很大兴趣。它们也是用于冶金炉的许多耐火材料的主要组成部分。

### 玻璃与高分子聚合物

这些物质不是结晶的, 其原子排列是无规的、非周期性的。大多数玻璃主要由硅酸盐离子  $\text{SiO}_2$  组成, 并加入一定数目的大尺寸的原子如 Na 及 Ca。由于这些加入的原子不能很好地符合硅酸盐的结构, 在其溶液冷却时, 将更不易发生结晶。因此, 玻璃是具有很高粘度的过冷液体。玻璃将在第 18 章中详细讨论。

高分子聚合物, 例如橡胶或丙烯酸树脂 (lucite), 由非常长的扭曲的、并且互相缠结在一起的有机分子

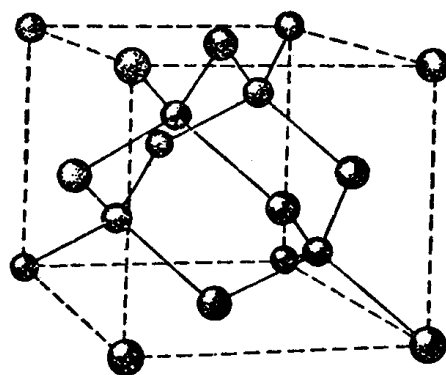


图1-13 金刚石的晶体结构, 纯碳的一种同素异晶体

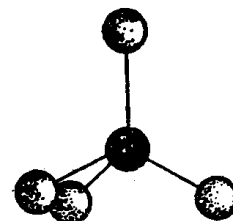


图1-14 四个氧原子与一个硅原子形成原子团 $\text{SiO}_4^{4-}$ 的四面体排列

组成。然而，有些高分子聚合物表现出一定的结晶性，在它们的某些部分，长分子都互相平行排列，因此，在这些部分，分子的排列是完全规律的。这些高分子聚合物，虽然按通常的术语意义来衡量，它们不具有规则的晶体结构，但是有时也称为结晶的。高分子聚合物的结构及性能包括在第十七章内。

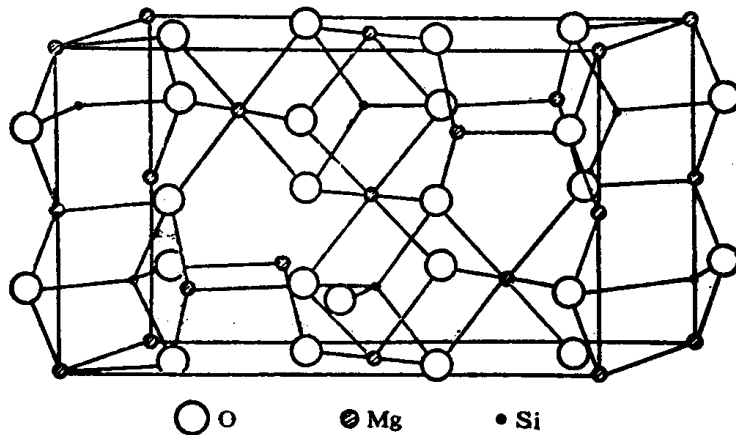


图1-15 橄榄石 ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) 的晶体结构

#### 1-4 机械性能特征及性能试验

##### 机械性能理论

了解材料的机械性能，是固态物理学家所面临的最困难的工作之一，而且这方面的进展不如在电、热、磁性能方面的进展那样大。为了便于讨论，常将机械性能分为弹性的或塑性的，以及组织敏感的或组织不敏感的。弹性性能为相应的弹性常数，而塑性性能则包括强度性能、蠕变、疲劳以及断裂特性（因为除理想的脆性材料外，断裂总是伴随着一些塑性流变）。组织敏感的性能，是指那些与材料中的原子尺度的缺陷的大小及分布关系很大的性能，因而，在同一材料中，它们在不同试样之间变化很大。例如，由于被试试样的过去的热及机械历程不同，在不同试样之间，纯金属的屈服强度的变化达 100% 甚至更高。组织不敏感的性能，例如金属的弹性及光学常数，则几乎所有试样都相同。

**弹性性能** 晶体的弹性常数，本质上是相对于其它原子来移动晶体中的原子所需的力的度量，因此，直接与原子间的键合力有关。图 1-16 即表示原子能量随原子间距离而变化的函数关系。原子间的平衡距离相应于曲线的极小点，即  $a$  点。沿  $x$  方向对晶体施加拉应力，将使原子间距离增加，晶体的能量也增加。可以证明， $x$  方向上的应变的弹性模数，直接与  $E-x$  曲线上的极小点的曲率成比例，即与  $\left(\frac{\partial^2 E}{\partial x^2}\right)_{x=a}$  成比例。

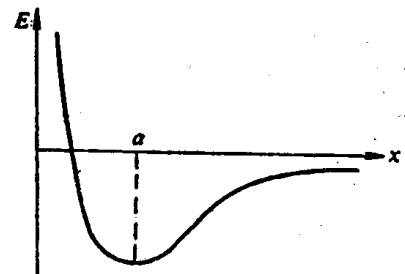


图1-16 晶体沿  $x$  方向膨胀或收缩的能量-位移曲线。点  $a$  相应于沿  $x$  轴的原子间的平衡距离

弹性常数与原子间力是如此密切相关，对任何已知材料，能够改变其弹性常数的方法极少。通过加入合金元素，它们能发生一定的变化，但对于施加于材料上的冷变形、辐照及其



他处理则是相当不敏感的。

非晶质材料是弹性各向同性的，即不管材料受力的方向如何，其杨氏模数及剪切模数均相同。然而，即使是立方结构的晶体也是弹性各向异性的。例如，铜的杨氏模数，从 $[111]$ 晶向的  $19400\text{kg/mm}^2$  改变为 $[100]$ 晶向的  $6800\text{kg/mm}^2$ 。各向同性的材料具有两个独立的弹性常数，立方晶体则有三个常数，而且在计算任一晶向的杨氏模数时，需要使用所有三个常数。如果多晶体金属的晶粒相互间的位向是杂乱的，则类似于弹性各向同性材料，其弹性常数为这些个别晶粒的弹性常数的平均值。

**塑性性能** 晶体的塑性性能是对组织敏感的性能，即与材料的特定试样中的缺陷以及理想晶体的特性有关。塑性性能将在第三章中详细讨论，但由于它们与机械试验有关，这里也要提及。

### 机械性能试验

材料的机械性能决定它对所受应力的反应。应力可以是拉应力也可以是切应力，可以单个地施加于材料也可以组合地施加。在工程力学中，描述材料对某一应力系的反应，可以是一个非常复杂的问题。为了研究材料的性能，冶金学家采用象拉伸试验这样的试验方法，在这些试验中，施加于试样的应力状态，是有意采用的简单的应力状态。当然，这样会出现一种危险，即在试验室的理想条件下得到的试验结果，对于不是简单的应力状态的实际情况可能不适用。许多工程结构产生惊人的失效，都恰好是由于对这一问题没有充分注意。然而，有关机械性能的任何研究，仍然是以理想化的试验室试验为出发点的。

**拉伸试验** 七十五年多以来，拉伸试验试样的断裂，是关于金属的机械性能的知识的主要来源，而且在今后很长时间内，这种试验方法也大概不会被取代。拉伸试验是具有直接实用价值的试验，但是拉伸试验数据的解释不象经常认为的那么简单。除非加以某些限制，否则，在试验过程中可能会收集到很多无用的数据。

**试验机与拉伸试样** 为了进行成功的拉伸试验，必须解决的主要问题如下所述：

1. 试样在试验机的夹头中必须保持固定，在加载后不会滑动。加载时，变形必须限制在试样的给定部分，特别是不能在夹头夹住的部分发生变形。为此目的，可在试样上加工出“标距长度”，而且标距部分的截面积大大小于被夹部分的截面积。在设计及加工拉伸试样时，必须避免在标距部分及其附近出现尖角或深的划痕，因为它们会引起应力集中，从而导致试样的过早破坏。

2. 必须决定试样中的应力状态。通常，是测量加于试样上的载荷，并假定这一载荷将在试样中引起均匀的拉应力，其大小为载荷除以标距部分的截面积。

3. 测量试样的应变是拉伸试验的最困难的部分。如果试样是在标距部分均匀地变形，在夹头处不产生滑动，在除标距部分以外的其他部分不产生变形，则应变可由全部伸长（等于十字头的位移）除以标距长度算出。由于大多数拉伸试验机的夹头及十字头装置的弹性及松弛，上面所述的情况不是经常能实现的，除非应变量大，否则，采用上述方法很难测量出真实的应变。要测量真实的应变可以采用直接胶合在试样上的应变仪。应变仪实际上是一段金属丝，其电阻随给定伸长的变化已精确测出。根据拉伸试验时金属丝的电阻的增加，可以观察出试样中的应变量。通常，桥式应变仪可以安装在试样上，以代替胶合在试样上的应变仪。

有些拉伸试验机安装成可以自动地在图表上记录由应变仪观察到的伸长以及由测力计测