

# 工程材料学

王于林 主编



航空工业出版社

# 工 程 材 料 学

王于林 主编

航空工业出版社

1992

(京)新登字161号

## 内 容 简 介

本书系统地阐述了工程材料的原子键、原子排列、力学性能、应变和温变对组织与性能的影响、凝固和相图基础知识、铁碳合金及热处理、铁基合金、有色金属、陶瓷、工程聚合物、复合材料以及失效分析方面的基础知识。本书阐述简明扼要、由浅入深、通俗易懂，注意理论联系实际。各章后附有思考题及习题。

本书适合于非材料专业的教学，也适合工程技术人员参考。

## 工 程 材 料 学

王于林 主编

---

航空工业出版社出版发行  
(北京市安定门外小关东里14号)

—邮政编码：100029—

全国各地新华书店经售  
南京航空学院印刷厂印刷

---

1992年11月第2版	1992年11月第1次印刷
开本：787×1692毫米1/16	印张：13.75
印数：7801—9200	字数：343.2千字

ISBN 7-80046-459-8/Z·081

定价：4.00元

# 前 言

《工程材料学》一书，是根据材料发展和应用状况以及高校非材料专业学生应具备的材料知识深度和广度而编写的。在保持航空特点的基础上，对内容收集及其处理作了较大调整，力图使读者掌握工程材料的全部基础知识；在各类材料中，着重阐述成分、结构、性能和应用，删减了一些不必要的工艺参数，以达到教学大纲要求的少而精的目的。为便于教学，各章后附有思考题及习题。

本书由王于林主编。第一、二、四、八、十、十一、十二章由王于林编写；第三、九、十三章由滕立霞编写；第五、六、七章由刘德潜编写。本书在编审出版过程中，很多同志为此付出了辛勤劳动，北京航空航天大学梁志勇老师提出过宝贵意见。在此一并表示谢意！

由于水平及时间有限，难免存在缺点和错误，恳望广大师生和读者批评指正。

编 者

1991.2.10

# 目 录

<b>第一章 工程材料的类型及其原子间的键合</b> .....	( 1 )
§ 1-1 工程材料及其分类.....	( 1 )
一、工程材料的发展及范围.....	( 1 )
二、工程材料的分类.....	( 1 )
§ 1-2 原子键合.....	( 3 )
一、金属键.....	( 3 )
二、共价键.....	( 3 )
三、离子键.....	( 4 )
四、范德瓦尔键(分子键).....	( 5 )
§ 1-3 不同类型键结合的特性.....	( 5 )
一、键结合的多重性.....	( 5 )
二、不同键结合的特性.....	( 5 )
<b>第二章 工程材料的原子排列</b> .....	( 7 )
§ 2-1 长程有序及晶体概念.....	( 7 )
一、原子排列的长程有序.....	( 7 )
二、晶体概念.....	( 7 )
三、同素异构.....	( 12 )
四、金属、陶瓷、聚合物晶体举例.....	( 12 )
§ 2-2 晶体缺陷.....	( 13 )
一、单晶体与多晶体.....	( 13 )
二、点缺陷.....	( 14 )
三、线缺陷.....	( 14 )
四、面缺陷.....	( 15 )
<b>第三章 工程材料的力学性能</b> .....	( 18 )
§ 3-1 拉伸试验.....	( 18 )
一、拉伸试验曲线.....	( 18 )
二、弹性.....	( 19 )
三、强度.....	( 20 )
四、塑性.....	( 21 )
§ 3-2 硬度试验.....	( 22 )

一、概述	( 22 )
二、布氏硬度	( 22 )
三、洛氏硬度	( 23 )
四、其他硬度	( 23 )
§ 3-3 冲击试验	( 24 )
一、冲击试验方法	( 24 )
二、冲击韧性	( 25 )
§ 3-4 疲劳试验	( 26 )
一、疲劳现象	( 26 )
二、疲劳强度指标	( 27 )
§ 3-5 蠕变试验	( 27 )
一、蠕变曲线	( 27 )
二、高温下蠕变性能指标	( 28 )
<b>第四章 塑性应变和温度对结构与性能的影响</b>	<b>( 30 )</b>
§ 4-1 塑性应变对结构与性能的影响	( 30 )
一、概述	( 30 )
二、单晶体的塑性应变	( 30 )
三、多晶体的塑性应变	( 34 )
四、塑性应变对组织与性能的影响	( 35 )
§ 4-2 温度对变形金属结构与性能的影响	( 37 )
一、回复	( 37 )
二、再结晶	( 38 )
三、晶粒长大	( 38 )
§ 4-3 超塑性成形	( 40 )
一、超塑性	( 40 )
二、超塑性条件	( 40 )
三、超塑性的原因	( 40 )
§ 4-4 金属的热加工	( 40 )
一、热加工与冷加工的区别	( 40 )
二、热加工对材料性能的影响	( 41 )
<b>第五章 凝固与细晶强化</b>	<b>( 43 )</b>
§ 5-1 概述	( 43 )
§ 5-2 纯金属的结晶	( 43 )
一、冷却曲线	( 43 )
二、晶核形成与长大	( 44 )
三、铸件的组织	( 45 )
四、细晶强化与铸件组织的控制	( 46 )

§ 5-3 聚合物、陶瓷的凝固与结晶	( 47 )
<b>第六章 二元相图固溶与时效强化</b>	( 49 )
§ 6-1 概述	( 49 )
§ 6-2 合金中的基本相及其特征	( 49 )
一、固溶体	( 49 )
二、金属化合物(中间相)	( 50 )
三、非晶相(玻璃相)	( 52 )
§ 6-3 匀晶相图及固溶强化	( 52 )
一、二元相图的建立	( 52 )
二、匀晶相图及平衡结晶过程	( 53 )
三、杠杆定律及应用	( 54 )
四、非平衡结晶过程	( 54 )
五、匀晶相图与性能关系——固溶强化	( 54 )
§ 6-4 共晶相图与时效强化	( 56 )
一、相图分析	( 56 )
二、典型合金平衡结晶过程	( 56 )
三、共晶相图与性能的关系——时效强化	( 58 )
§ 6-5 其他二元相图	( 60 )
一、具有稳定化合物的二元相图	( 60 )
二、陶瓷二元相图	( 60 )
<b>第七章 铁碳合金及热处理</b>	( 62 )
§ 7-1 碳钢	( 62 )
一、Fe-Fe <sub>3</sub> C 相图及基本相	( 62 )
二、Fe-Fe <sub>3</sub> C 相图分析	( 64 )
三、典型合金的平衡结晶及组织	( 65 )
四、碳与杂质对钢性能的影响	( 67 )
五、碳钢的分类、编号及应用	( 68 )
§ 7-2 铸铁	( 69 )
一、白口铸铁	( 69 )
二、灰口铸铁	( 70 )
三、球墨铸铁	( 71 )
四、可锻铸铁	( 72 )
§ 7-3 钢的热处理	( 73 )
一、概述	( 73 )
二、钢加热时的组织转变	( 73 )
三、奥氏体的非平衡冷却转变	( 75 )
四、热处理工艺	( 81 )

五、表面淬火·····	( 90 )
六、化学热处理·····	( 90 )
<b>第八章 铁基合金·····</b>	<b>( 98 )</b>
§ 8-1 合金钢·····	( 98 )
一、合金元素的类型及存在形式·····	( 98 )
二、合金元素的主要作用·····	( 98 )
三、合金钢的分类与编号·····	( 101 )
四、渗碳钢·····	( 102 )
五、调质钢·····	( 103 )
六、超高强度钢·····	( 105 )
七、弹簧钢·····	( 106 )
八、合金工具钢·····	( 108 )
§ 8-2 不锈钢·····	( 112 )
一、金属腐蚀及抗蚀途径·····	( 112 )
二、马氏体不锈钢·····	( 113 )
三、奥氏体不锈钢·····	( 114 )
§ 8-3 铁基高温合金·····	( 116 )
一、高温合金的性能·····	( 116 )
二、高温合金的分类与编号·····	( 117 )
三、变形铁基高温合金·····	( 117 )
四、铸造铁基高温合金·····	( 119 )
<b>第九章 有色金属及其合金·····</b>	<b>( 121 )</b>
§ 9-1 概述·····	( 121 )
§ 9-2 镍基高温合金·····	( 121 )
一、变形镍基高温合金·····	( 122 )
二、铸造镍基高温合金·····	( 124 )
§ 9-3 铝合金·····	( 125 )
一、铝的合金化及铝合金分类·····	( 125 )
二、铝合金热处理特点·····	( 127 )
三、变形铝合金·····	( 129 )
四、铸造铝合金·····	( 131 )
§ 9-4 镁合金·····	( 133 )
一、镁的合金化及镁合金分类·····	( 133 )
二、变形镁合金·····	( 134 )
三、铸造镁合金·····	( 135 )
§ 9-5 钛及钛合金·····	( 135 )
一、工业纯钛及钛的合金化·····	( 135 )



二、钛及其合金的主要特性·····	( 137 )
三、钛合金的热处理·····	( 138 )
四、常用钛合金·····	( 139 )
§ 9-6 铜及铜合金·····	( 140 )
一、纯铜·····	( 140 )
二、黄铜·····	( 140 )
三、青铜·····	( 141 )
<b>第十章 陶瓷材料</b> ·····	( 145 )
§ 10-1 陶瓷材料概述·····	( 145 )
一、陶瓷材料的发展·····	( 145 )
二、陶瓷材料的分类·····	( 145 )
§ 10-2 陶瓷的结构与组织·····	( 145 )
一、陶瓷材料的键结类型·····	( 146 )
二、陶瓷材料的组织·····	( 146 )
§ 10-3 陶瓷制品的工艺过程·····	( 148 )
一、普通陶瓷·····	( 148 )
二、特种陶瓷·····	( 149 )
§ 10-4 陶瓷材料的性能·····	( 150 )
一、力学性能·····	( 150 )
二、其他性能·····	( 151 )
§ 10-5 工程结构陶瓷材料的应用·····	( 152 )
一、高温高强度陶瓷材料·····	( 152 )
二、工模具陶瓷材料·····	( 153 )
三、其他陶瓷材料·····	( 156 )
<b>第十一章 工程聚合物</b> ·····	( 158 )
§ 11-1 聚合物及其基本概念·····	( 158 )
一、聚合物及其类型·····	( 158 )
二、聚合物结合键及加聚、缩聚反应·····	( 158 )
三、单体与链节·····	( 160 )
四、聚合度、官能度和分子量·····	( 160 )
§ 11-2 线型聚合物·····	( 160 )
一、分子链的形状和空间构形·····	( 160 )
二、聚合物的聚集状态·····	( 162 )
三、共聚物·····	( 164 )
§ 11-3 网型聚合物·····	( 165 )
§ 11-4 聚合物的力学性能·····	( 166 )
一、拉伸性能·····	( 166 )

二、硬度和冲击强度	( 168 )
三、聚合物的疲劳强度	( 168 )
四、影响聚合物力学性能的因素	( 169 )
§ 11-5 聚合物的成形工艺	( 170 )
§ 11-6 聚合物的选用	( 171 )
一、选用原则	( 171 )
二、工程塑料简介	( 172 )
三、工程塑料的应用	( 173 )

## 第十二章 复合材料 ( 174 )

§ 12-1 复合材料及其类型	( 174 )
一、复合材料的含义	( 174 )
二、复合材料的分类	( 174 )
§ 12-2 材料的复合原理	( 175 )
一、基体的作用	( 175 )
二、增强纤维的作用	( 175 )
三、基体和增强材料之间的结合力	( 176 )
§ 12-3 复合材料的性能	( 176 )
一、比强度和比模量	( 176 )
二、疲劳与破断安全性能	( 177 )
三、高温性能	( 178 )
四、减振特性	( 178 )
§ 12-4 树脂基复合材料的基体类型	( 178 )
一、热固性树脂	( 178 )
二、热塑性树脂	( 178 )
§ 12-5 玻璃纤维及其增强的复合材料	( 179 )
一、玻璃纤维	( 179 )
二、玻璃纤维树脂复合材料	( 180 )
§ 12-6 碳纤维及其增强的树脂基复合材料	( 182 )
一、碳纤维	( 182 )
二、碳纤维复合材料	( 183 )
§ 12-7 硼纤维及其增强的树脂基复合材料	( 184 )
一、硼纤维	( 184 )
二、硼纤维环氧树脂复合材料	( 184 )
§ 12-8 聚芳酰胺 (Aramid) 纤维及其增强的复合材料	( 185 )
§ 12-9 晶须及其增强的树脂基复合材料	( 185 )
一、晶须	( 185 )
二、晶须树脂基复合材料	( 186 )
§ 12-10 金属基复合材料	( 186 )

一、硼纤维增强的金属基复合材料·····	( 187 )
二、石墨纤维增强的金属基复合材料·····	( 188 )
三、氧化铝晶须增强镍复合材料·····	( 188 )
<b>第十三章 失效分析及选材原则·····</b>	<b>( 190 )</b>
§ 13-1 机械零件失效及分析·····	( 190 )
一、概述·····	( 190 )
二、机械零件失效分析·····	( 190 )
§ 13-2 常见失效形式的鉴别·····	( 193 )
一、过量变形失效·····	( 193 )
二、断裂失效·····	( 193 )
三、表面损伤失效·····	( 197 )
§ 13-3 选材一般原则·····	( 199 )
一、材料的失效抗力·····	( 199 )
二、材料的工艺性·····	( 200 )
三、注意经济性·····	( 201 )
§ 13-4 典型零件选材分析·····	( 201 )
一、飞机起落架·····	( 201 )
二、发动机涡轮轴·····	( 202 )
二、机床齿轮·····	( 204 )
四、航空零部件复合材料的应用·····	( 205 )
<b>附录：黑色金属硬度与强度换算表·····</b>	<b>( 207 )</b>

# 第一章 工程材料的类型及其原子间的键合

## § 1-1 工程材料及其分类

### 一、工程材料的发展及范围

人类生产、生活离不开材料。材料的重要性使史学家根据生产工具使用的材料来划分历史时代，即划分为石器、青铜、铁器时代。这说明材料的发展，标志着社会的进步和发展。

我们的祖先在原始社会开始使用石器，后期已人工制作陶器，并由此发展到汉代象征中国古代文化的瓷器。夏、商、周时已炼制青铜，并将其应用于工具和兵器。春秋战国时已炼铁，到汉代已有“先炼铁后炼钢”的技术，居世界领先地位。在青铜、钢铁材料发展基础上，18世纪世界各国工业迅速发展，对材料提出了新的要求，因而总结形成一门新的科学，即“金属学”，以研究金属材料的成分、内部结构和性能之间的关系。

现代工业技术与材料的发展关系更为密切，能源、信息、材料已成为现代技术的三大支柱。工、农业和国防建设，要求生产出更多更好的材料。例如飞机由木质结构发展到使用铝合金，时速由几十公里增加到几百公里。不锈钢和钛合金的使用，才有可能实现超音速飞行。超高强度钢的使用，可减轻飞机的自重，从而节省燃料、提高性能、使飞机飞得更远更快。新型高温合金的发展，才有可能制造出推力更大的发动机。现代航空和宇航的发展，除要求性能更好的金属外，还必须发展、应用非金属结构材料，如工程聚合物、陶瓷材料和复合材料，以减小总体结构重量并满足诸如重返大气层的一些特殊性能要求。

历史上，由使用天然非金属材料，发展到使用金属材料，标志着社会的进步。如今主要结构材料已不再只是金属。在发展高性能金属材料的同时，迅速发展和应用人工非金属材料，标志现代技术的进步。人类正在进入人工合成非金属材料 and 复合材料的时代。因此，“金属学”已不能全面反映现今各类材料的研究、生产和应用中的问题，因而形成了一门新兴的“材料科学”。这门科学研究所有固体材料的成分、内部结构和性能之间的关系。

“工程材料学”涉及的范围只是固体材料领域中有关工程结构、机械零件和工具制造，并且主要要求力学性能的材料，并研究这些材料的成分、内部结构、性能和应用之间的关系。

### 二、工程材料的分类

固体材料可分为两类，一类是无机物，另一类是有机物。无机物中的金属、陶瓷和有机物中的聚合物均是工程材料。此外由金属与陶瓷、金属与聚合物、聚合物与陶瓷之间复合而成的复合材料，也属工程材料。所以，工程材料可分为四类：金属材料、陶瓷材料、高分子材料（即聚合物）和复合材料，如图 1-1 所示。

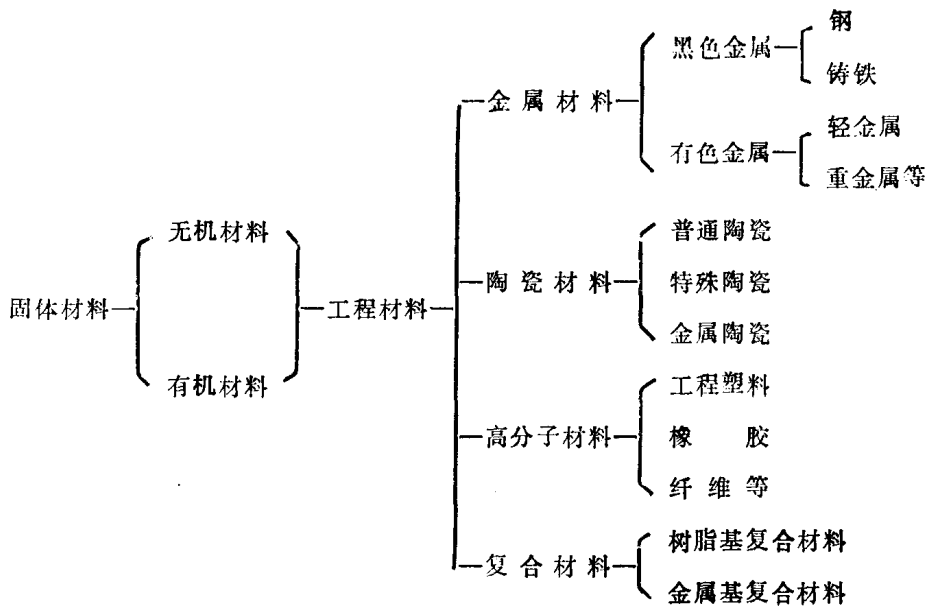


图1-1 固体和工程材料的分类

### 1. 金属材料

金属材料在工业上又可分为黑色金属及有色金属两类。

(1) 黑色金属 是指铁及以铁为基的合金，如钢、合金钢、铸铁及其他铁基合金。

(2) 有色金属 是指黑色以外的所有金属及其合金。如镍和镍基合金、铝和铝合金、铝和铝合金、镁和镁合金、钛和钛合金。其中铝、镁、钛及其合金等，比重( $\gamma$ )小于4.5，又称轻金属或轻合金。

在四类工程材料中，应用面最广、用量最大、承载能力最高的，仍在黑色金属范围之内。有色金属中的轻合金，在航空工业中有着特别重要的意义。这类材料用在飞机、发动机上，可减小飞机重量。

### 2. 陶瓷材料

陶瓷是指硅酸盐、金属同非金属元素的化合物，如氧化物、氮化物等。工业上用的陶瓷，可分为三类：一类是硅、铝的氧化物以及硅酸盐，称为普通陶瓷。第二类是人工氧化物、碳化物、氮化物和硅化物等的烧结材料，称为特种陶瓷。第三类是金属粉末与陶瓷粉末烧结材料，称为金属陶瓷。

陶瓷性能最大特点，是有高的硬度、高的耐磨性、高的耐蚀性和高的抗氧化能力。但最大弱点是塑性极低、太脆。所以很少在常温下用作受力的结构材料。但作为耐高温材料，陶瓷潜力很大，如图1-2所示。此外，陶瓷在光、电、热方面还有独特的性能。

### 3. 聚合物

聚合物即高分子材料，是由许多分子量很大的大分子组成。构成大分子的原料为石油产品。在工程应用中，高分子聚合物根据性能和使用状态，可分为工程塑料、橡胶和合成纤维。工程塑料中，有些在受热后有极好的延性和

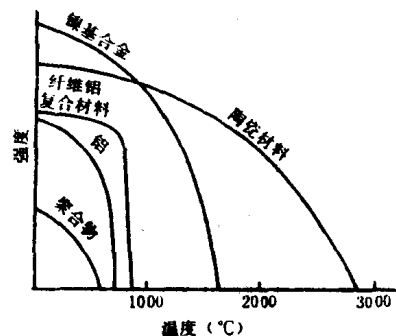


图1-2 不同温度下不同类型材料的强度

成型性，称为“热塑性塑料”；而另一些在受热后即失去延性，称为“热固性塑料”。前者一般强度低，后者通常强度较高，但均有轻质、耐腐蚀性能特点。

#### 4. 复合材料

由两种或两种以上固体物质组成的材料，称为复合材料。复合材料的性能，是组成它的任何单一材料所不具备的。例如玻璃钢，是由玻璃纤维布与热固性高分子材料复合而成的，而玻璃钢的性能，既不同于玻璃纤维，也不同于组成它的高分子材料。复合材料可以是轻质、强度高、耐高温、硬而耐磨的工程材料。这类材料在建筑、机械制造、交通和国防等方面，有着日益发展的前景。目前作为工程材料使用的复合材料主要有两类，一类是树脂基复合材料，另一类是金属基复合材料。

### § 1-2 原子键合

固体材料的原子，能够堆积在一起的原因，是靠原子之间的键合。原子之间的键合机制有四种，即金属键、共价键、离子键和范德瓦尔键。

#### 一、金属键

金属元素往往失去原子的最外层价电子而变成带正电的离子，失去的电子则形成围绕离子的电子云，如图 1-3 所示。脱离原子的价电子，这时不再与某一特定的正离子相互吸引，而是在电子云中自由运动，成为与若干个正离子相吸引的电子。通过正离子与电子之间相互吸引，使所有正离子之间，正离子与电子结合在一起。这种结合力就是金属键。

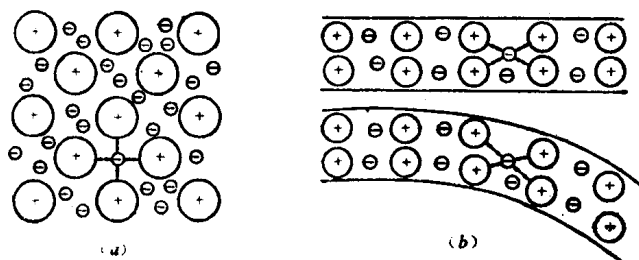


图 1-3 金属键（如箭头所示）

(a) 金属原子正常堆积时的金属键及其电子云      (b) 金属变形时的金属键（方向变化而未破坏）

当金属发生弯曲等变形时，金属原子将改变它们彼此之间的位置关系，并不使键破坏。因此，金属键使金属具有良好的塑性。在电压作用下，电子云中的价电子将发生运动，因而金属有良好的导电性。正离子在热的作用下，震荡加剧并传递热量，因而金属有良好的导热性。

#### 二、共价键

一些陶瓷（如金刚石、碳化硅、氧化硅）和一些聚合物是通过共价键使它们的原子结合在一起的。以硅为例，一个 4 价的硅原子，与 4 个在它周围的硅原子共享最外层的电子，从

而使每个硅原子最外层获得满层的 8 个电子，如图 1-4 所示。每一个共有电子代表 1 个共价键，所以 1 个硅原子有 4 个共价键与 4 个邻近的硅原子结合。

硅为共价键合，硅原子排列必须堆集成四面体，即 4 个硅原子构成 1 个四面体，另有 1 个硅原子处在四面体的中心（见图 1-5），因此表征原子之间结合力的共价键之间形成一定的角度（ $109^\circ$ ，称为键角），即共价键彼此之间有固定的方向关系。

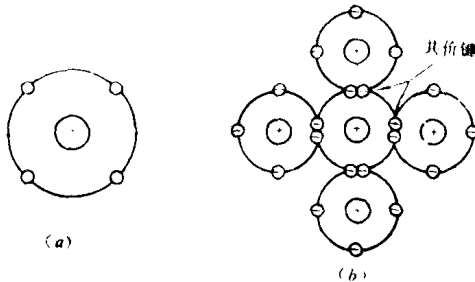


图 1-4 硅的共价键  
(a) 硅原子 (b) 硅的 4 个共价键

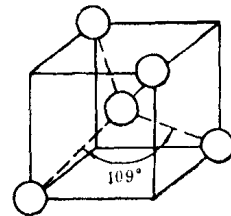


图 1-5 硅的四面体和键角

$\text{SiO}_2$  中的氧和硅原子是共价键结合，如图 1-6 所示，1 个 4 价硅原子与 4 个 6 价氧原子共享价电子，所以每个硅原子的价电子总数为 8，而 1 个 6 价氧原子只和 2 个硅原子共享电子，所以氧的价电子数亦为 8。二氧化硅中氧原子必须排成四面体结构，而硅原子处于四面体的中心，如图 1-6(b) 所示。

由于共价键本身很强，而且键之间有固定的方向关系，所以不能象金属原子那样，在受外力时可以产生位移变形。因此，共价键结合起来的材料，硬而脆，塑性很差。受力时要么不变形、要么使键合破坏使材料折断。共价键材料，若要使其中的共享电子运动而导电，必须破坏共价键，例如受高温或高压作用。

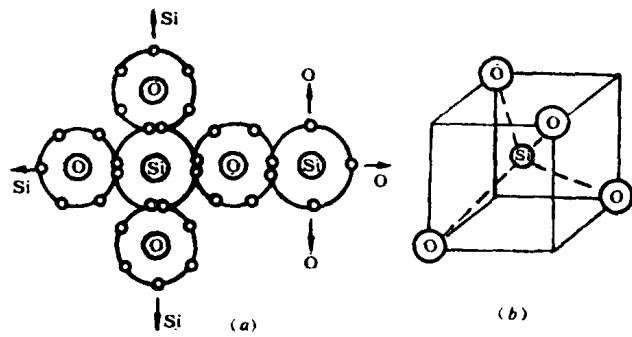


图 1-6  $\text{SiO}_2$  的共价键合  
(a) 共价键 (b)  $\text{SiO}_2$  四面体结构

### 三、离子键

部分陶瓷材料（如  $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2$  等）和矿物，是依离子键合将原子堆积排列在一起的。当一种材料有  $A$ 、 $B$  两种原子时，如  $A$  原子将它的价电子贡献给  $B$  原子， $A$  原子外层电子在空出后具有满层电子数， $B$  原子外层电子亦被填满时，则  $A$  变成正离子， $B$  为负离子，由于正负离子的吸引就产生离子键。离子键使  $A$ 、 $B$  原子结合在一起。离子键简单的例子为氯化钠，如图 1-7 所示。由图可知， $\text{Na}$  的外层电子贡献给  $\text{Cl}$ ， $\text{Na}$  变为带正电的离子，而内层电子数为 8，是满层电子数； $\text{Cl}$  接受 1 个电子，变为带负电的离子，并使外层电子数为 8，也是满层电子数。所以 1 个  $\text{Na}$  原子和 1 个  $\text{Cl}$  原子依正负离子间的吸引力而结合在一起。

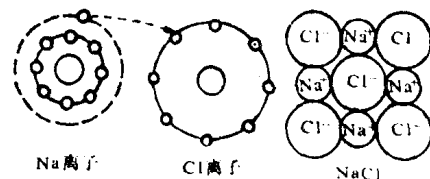


图 1-7  $\text{NaCl}$  的离子键

离子键结合起来的材料，受到一定大小的外力作用时，离子之间将失去电的平衡作用，而使离子键破坏，宏观上则表现为材料破断。所以离子键材料脆性大，而且在常温下导电性很差，在熔融状态，因整个离子运动容易，又易于导电。

#### 四、范德瓦耳键（分子键）

一些物质，如水、塑料、陶瓷，它们的分子或原子团，往往具有极性，即分子的一部分带正电，而另一部分带负电。一个分子带正电的部位，同另一个分子带负电的部位之间就存在比较弱的静电吸引力，这种吸引力就称为范德瓦耳键。例如高分子材料聚氯乙烯，是由C、H、Cl构成的大分子（链状），如图1-8(a)所示。图中一个大分子链的内部，如C-C原子之间，主要由共价键合，但一个大分子链中碳原子的两侧，可为H原子并带正电，亦可为氯原子并带负电。那么两个大分子链之间，带正电的氢原子和带负电的氯原子，存在较微弱的静电引力，即构成范德瓦耳键。因为这种键合较弱，所以在力的作用下，键易破坏平衡，并产生滑动而产生很大变形（如图1-8(b)所示），表明范德瓦耳键结合的大分子材料可有很高的塑性。

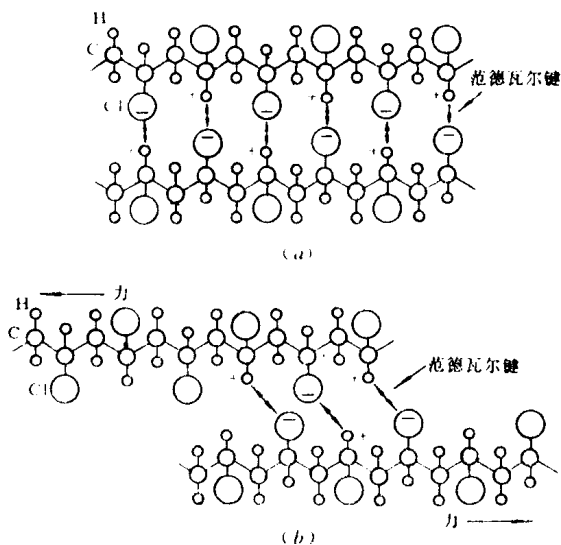


图 1-8 聚氯乙烯的范德瓦耳键

### § 1-3 不同类型键结合的特性

#### 一、键结合的多重性

以上所述为工程材料中，将原子联系聚集在一起的四种键的结合机制。工程材料中只有一种键合机制的材料并不多见，大多数的工程材料是以共价键、金属键、离子键三种混合机制方式结合的。例如：

1. 金属 虽然是典型的金属键，但工程材料中的大多数金属内，不只是含有一种金属原子，通常还含有其他物质，如化合物等。因此，金属材料大多是除范德瓦耳键以外的多种键合机制。
2. 陶瓷 是以离子键(尤其是  $Al_2O_3$ 、 $MgO$  等金属氧化物)和共价键(如  $Si_3N_4$ 、 $SiC$  等)为主的结合键。所以通常陶瓷材料也是以两种或两种以上的键合机制进行结合的。
3. 工程塑料 有共价键、范德瓦耳键等机制进行结合。
4. 复合材料 可以有三种或三种以上的键合机制。

#### 二、不同键结合的特性

虽然工程材料中可有不同的键结合机制，但是毕竟存在主次之分。如金属材料，以金属键为主，氧化物陶瓷材料以离子键为主，高分子材料以共价键为主。



不同键结合的强弱是用结合键能来表达的。不同键合的键能如表 1-1 所示。可见，离子键能最高，共价键能其次，金属键能第三，而范德瓦尔键最弱。因此，反映在不同键结合的材料特性上将有明显差异，离子键、共价键材料的熔点高、硬度高，范德瓦尔键的熔点低，硬度也低。

表 1-1 不同结合键能及其材料的特性

结合键种类	键能(KJ/mol)	熔 点	硬 度	导 电 性	键的方向性
离 子 键	586—1047	高	高	固态不导电	无
金 属 键	113—350	有高有低	有高有低	良 好	无
共 价 键	63—712	高	高	不 导 电	有
范德瓦尔键	<42	低	低	不 导 电	有

### 思考题及习题

1. 工程材料可分为哪几类？在金属材料中何谓有色金属，何谓轻金属？
2. 陶瓷材料可分哪三类？工程塑料可分为哪两类？何谓复合材料？可分为哪两类？
3. 固态金属的原子为何能堆积在一起，又为何具有良好的塑性、导电性和导热性？
4. 什么是共价键？共价键之间存在的键角，说明什么问题？共价键合的材料为何通常情况下都具有硬而脆的性能特征？
5. 什么是离子键？离子键结合起来的材料为何具有高的脆性？
6. 什么是范德瓦尔键？依这种键结合起来的材料，在外力作用下可否变形？
7. 大多数工程材料是以一种还是两种以上键合机制来把原子结合在一起的？金属材料是否只有金属键？
8. 四种键合机制的材料，其熔点、硬度与键合机制大致有何关系？