

高等学校教材

材料科学基础

(第3版)

刘智恩 主编

西北工业大学出版社

出版者的话

能源、信息、材料被认为是 21 世纪国民经济的三大支柱,其中材料是各行各业的基础,可以说,没有先进的材料,就没有先进的工业、农业和科学技术,因此,材料研究显示出越来越重要的地位。目前,材料科学已延伸到包括电子工程、生物工程、航空航天技术、建筑工程等学科在内的各主要研究领域。新材料、新工艺的不断产生,对材料的研究提出了更新更高的要求。为了适应现代科学技术迅猛发展的趋势,推动材料学科向前发展,必须高度重视材料学科的基础教育和人才培养,为未来的研究和进步奠定坚实的基础,储备充满活力的有力的后备军。

1998 年 7 月,教育部正式颁布了经第四次全面修订后的普通高等学校本科专业目录,相应地,其专业培养目标、主干学科、主要课程、主要教学实践环节等都有了不同程度的变化。在这种形式下,要适应社会的发展,适应新的专业培养目标和教学要求,组织编写一套全方位的材料类专业系列教材就成了当务之急。

西北工业大学是首批进入国家“211 工程”建设项目的全国重点大学之一,其严谨求实的学风和高水平的师资队伍享誉社会。西北工业大学拥有多个国家重点学科,其中材料学科在全国占有突出的地位。西北工业大学材料学院现有 5 个博士点和 1 个博士后流动站,并有一大批驰名中外的专家学者,其中包括中国科学院院士 1 名、中国工程院院士 2 名。他们为我国材料学科的发展起了巨大的推动作用。我们利用材料学科的这种优势,在教材规划小组、专家评审小组及材料学科课程指导委员会的指导下,经过多次论证、优化,首批推出包括金属材料和非金属材料专业在内的教材 14 种,基本涵盖了材料学科的主干课程。

本系列教材定位于普通高等学校材料类专业本科层次,具有以下特点。

1. 内容新颖,体现先进性

材料学科近年来发展迅猛,各种新材料、新工艺不断涌现,并与计算机技术联系越来越紧密,本系列教材力求反应这些内容,体现内容的前瞻性。

2. 作者实力强大,体现高水平

本系列教材的作者均为博导或具有博士学位的教授、副教授,他们从事一线教学工作多年,具有丰富的教学经验和丰硕的研究成果。

3. 体系全新,体现新观念

本系列教材适应教学改革的需要和市场经济对人才培养的要求,各门课程在以前的基础上更注重实践环节,内容的安排更适合学生的自主学习。

4. 编写形式多样,体现新思路

网络化、电子化、数字化是当今社会的特色,本系列教材提倡电子讲稿和多媒体课件的配套出版,以便给作者和读者提供一个更加广阔的发展空间。

回顾过去多年材料学科教材和专著的出版工作,我们积累了不少宝贵的经验,取得了显著的成绩。西北工大版的多种教材、专著一直畅销不衰,这无疑是对我们的鼓励和支持。步入 21 世纪的今天,我们郑重推出这套材料科学系列教材,希望它能得到专家及广大读者的厚爱。我们愿为推动材料学科的发展不懈努力,我们愿为新世纪中国高等教育事业做出更大的贡献。

21 世纪材料科学系列教材编委会

西北工业大学出版社

西北工业大学 21 世纪系列教材编委会

顾 问 周尧和 傅恒志 张立同 陈士橹 沈绪榜

陈一坚 杨士莪 乐嘉陵 王兴治

编委会主任 杨海成

编委会副主任 王润孝

委 员 万小鹏 张启勋 李铁虎 张近乐 魏生民

执行编委 李 辉 雷 军

21 世纪材料科学系列教材编委会

主 任 介万奇

副主任 宁荣昌

委 员 刘正堂 秦华宇 席守谋 刘金合 胡小玲 李淼泉

黄卫东 王汝敏 吴诗惇 郑修麟 蓝立文 张克惠

刘智恩 姚泽坤 寇开昌 李克智

第 3 版前言

《材料科学基础》出版以来,深受广大读者的喜爱,一直保持着较大的发行量。特别是 2004 年该课程获得“国家精品课程”称号以来,该教材更加受到大家的关注。为了满足广大读者的需求,我们再次修订出版这本教材。

本次教材修订的主导思想,仍然是坚持基本理论的系统性和完整性,强调工程实践性,注意理论联系实际。正因为如此,本书保持了第 2 版教材的特点:以金属材料、陶瓷材料、高分子材料及复合材料为对象,介绍其成分—结构—微观组织—性能之间的关系,涉及的基本理论包括以下几方面:

- (1) 晶体学基础及晶体缺陷理论;
- (2) 材料的结构(相结构)理论;
- (3) 凝固理论;
- (4) 材料热力学及平衡理论;
- (5) 扩散理论;
- (6) 材料强韧化理论;
- (7) 固体动力学理论;
- (8) 材料复合理论。

这些基本理论,对于发展新材料、培养学生创新能力是很重要的。为了能够很好地便于学生掌握这些理论,书中注意联系生产实例进行分析、引导,同时精选了相关内容的例题、习题供读者思考、理解。这不仅有助于培养学生自主获取知识的能力,而且有助于提高分析问题和解决问题的能力。

在教材编写上,力求作到简明扼要,重点突出。从这一指导思想出发,对原教材中的有关内容进行了取舍和补充。

本书在修订过程中,采纳了一些教材使用者的宝贵意见,得到西北工业大学出版社雷军、王夏林等同志的大力支持和热忱帮助,材料科学与工程学院领导刘正堂教授对本书修订工作给予了很大支持和指导,在此一并感谢!

由于我们水平有限,缺点和错误难免,恳切希望读者批评指正。

编 者

2007 年 7 月

第 2 版前言

材料在人类历史进程中的地位已为人所共知,新型材料在现代文明中的地位尤为突出。从世界科技发展史看,重大的技术革新往往起始于材料的革新;反过来,新技术的发展又促进了新材料的研制。目前已涌现出各种各样的新材料,如结构与功能陶瓷、陶瓷基与金属基复合材料、金属间化合物与轻金属、表面改性材料、薄膜材料及生物材料等。与几十年前相比,我们已进入了一个材料多样化的时代。

新材料具有特殊的性能,如超高强度、超高硬度、超塑性、超导性及各种特殊物理性能;新材料的制备和生产往往和新技术、新工艺紧密相关,如为了制得纤维增强的新型复合材料,就需要制备高强度、高热稳定性、无缺陷的纤维,并能解决它们与基体的复合工艺;新材料的发展和传统材料相比,更依赖于材料理论。正是由于新材料的不断发展,以及新材料、新技术对材料理论的日益需要和推动作用,材料科学与工程这一新的学科才应运而生。

材料科学与工程学科的任务是研究材料的结构、性能、加工、使用状况四者之间的关系。这里所指的材料,包括传统材料和各种新型材料。人们预计,不仅在目前,而且在今后一个时期内,结构材料仍然是材料的主体部分。结构材料将向着更高温、更高强度、更高比刚度的方向发展,对航空发动机来说,高温合金仍然是最关键的材料。从正在发展中的材料来看,陶瓷是当前的热点。由于这类材料有很多的优点,如低的线膨胀系数($(3\sim4)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),良好的高温温度(当前可达 $1\,400^{\circ}\text{C}$),优良的环境稳定性、耐腐蚀性、抗氧化性,低密度,高硬度,耐磨性好,有丰富的资源等,因此发展前景十分光明。在今后的 30 年,复合材料将有广泛的应用。复合材料不仅可作为一类高温材料使用,而且可用于改善材料其他性能,如陶瓷基复合材料主要是用来解决脆性或提高断裂韧性等问题,金属基复合材料及树脂基复合材料可以大幅度提高刚度(弹性模量)和抗疲劳性能等,碳/碳复合材料可提高热震性能等。所以,金属基、陶瓷基及碳/碳基复合材料仍是当前研究的重点。

作为材料科学与工程系的核心专业基础课,本教材与传统的《金属学》和《金属材料学》不同。它所讲述的内容并不局限于金属材料,而是适应材料科学发展的需要,以金属材料、无机非金属材料、高分子材料及复合材料为研究对象,介绍各类材料的成分、结构、显微组织与性能之间的关系,强调各类材料微观结构与宏观表现这一材料共性,拓宽了知识面。

本教材的主要内容包括以下几部分:

- (1) 工程材料中的原子排列(固体中的结合键、晶体学基础、晶体缺陷理论);
- (2) 固体中的相结构(材料的结构理论);
- (3) 凝固(凝固理论);
- (4) 相图(材料热力学及平衡理论);

- (5) 固体中的扩散(扩散理论);
- (6) 塑性变形(材料强韧化理论);
- (7) 回复与再结晶(回复、再结晶的规律);
- (8) 固态相变(固体动力学理论);
- (9) 复合效应与界面(材料复合原理)。

以上内容都是材料科学的基础理论,它对于发展新材料、培养学生创新能力具有深远的意义。

本书的主要特点:从固体的键合理论、原子排列、组织结构等三个不同层次,阐明各类材料微观结构与性能的本质联系及其共性规律;以常用工程材料为对象,阐述其共性原理,拓宽了学生的知识面,并反映了当今材料多样化的特点;书中精选了配合教材内容的例题、习题,特别是例题之多,同类书中较为少见。这不仅有助于学生自主获取知识能力的培养,而且能提高分析问题和解决问题的能力。

本书可作为材料科学与工程专业、金属材料及热处理专业、铸造、焊接、锻造及腐蚀与防护等专业的教科书,也可作为有关工程技术人员的参考书。

本教材授课时数为 80 学时左右。使用本教材之前,学生应学完高等数学、普通物理、物理化学、材料力学等课程,并初步具有材料生产和使用方面的实践知识。

本书第 1 版于 2000 年由西北工业大学材料科学与工程学院刘智恩、吕宝桐、乔生儒、侯晏红 4 位教师在他们长期从事金属学、金属机械性能、复合材料等课程教学的基础上共同编写而成。

根据这几年本教材的使用情况,特别是国防科工委对材料科学与工程类各专业本科生核心专业基础课的要求,校教材委员会决定由刘智恩同志征集各方意见,对全书进行修订(第 2 版)。本次修订较系统地阐明本学科的基本理论,加强宏观规律和微观机理的结合;对原书中出现的错误之处,进行了更正。同时,在层次安排上做了必要的调整,以满足教学的需要。修订后全书共分为 9 章,将原书中的第 4 章、第 5 章合并为一章“相图”,并对某些内容进行了改写;对于各章中必要的图表、资料、例题做了适量的补充,更便于读者自学。

本书在修订过程中,除了第 1 版教材的有关作者及教材使用者提出了很多宝贵意见外,还得到西北工业大学出版社王夏林、雷军等同志的大力支持和热忱帮助,材料科学与工程学院领导对本书的修订工作给予了很大支持,在此深表感谢!

由于我们水平有限,缺点和错误一定不少,恳切希望读者批评指正。

编 者

2002 年 10 月

第 1 版前言

为了适应材料科学的发展,拓宽知识面,加强基础,同时考虑到按大学招生、培养的需要,在原有的《金属学原理》基础上,参考国内外教学发展趋势,编写了《材料科学基础》这本教材。

近些年来,由于现代科学技术的迅猛发展,对材料提出了更高、更新的要求。在专业的培养目标上,就材料知识而言,必须从金属材料扩展到陶瓷、高分子和复合材料。所以,这本书是以工程材料为对象,阐述它的基本原理和基础知识,这和那些仅以金属材料为对象的《金属学原理》是不同的。

《材料科学基础》从材料的内部结构探讨其性质与行为,揭示材料结构与性能的内在联系及规律,为认识和改进材料的性能提供必备的基础知识。人们可以从其基本理论出发,指导材料的生产及科研,解决材料使用中的问题。

鉴于金属材料在当今工业材料应用中仍然占据主导地位,金属学相对于其他材料学科更成熟、更严密,其理论及研究方法也正在向其他材料学科移植和渗透,所以,保证金属学的分量和教学时数,无论从加强基础和实际应用来说都是必要的。正因为如此,在《材料科学基础》中,涉及陶瓷、高分子及复合材料的基础知识约占 $2/5$,而在教学时数上不超过 $1/4$ 。

《材料科学基础》是材料科学与工程专业本科生一门重要的专业基础课,以介绍工程材料的基础知识为目的。主要内容包括工程材料中的原子排列、固体中的相结构、凝固与结晶、二元相图、三元相图、固体中的扩散、塑性变形、回复与再结晶、复合效应与界面、固态相变共 10 章。教学中可突出各类材料的共性,注意不同材料中的个性。

本书的主要特点是以常用工程材料为对象,阐述其共性原理;书中选用了较多的例题,以利于学生对基础知识的理解,也有利于培养学生分析问题和解决问题的能力。

本书可作为材料科学与工程专业,金属材料及热处理专业,铸造、焊接、锻造及腐蚀与防护等专业的教科书,也可作为有关工程技术人员的参考书。

本教材授课时数为 80 学时左右。使用本教材之前,学生应学完物理化学、材料力学等课程,并初步具有材料生产和使用方面的实践知识。

本书共 10 章。其中,第 1~4 章由西北工业大学刘智恩副教授编写,第 5,6 章由西北工业大学吕宝桐教授编写,第 7,8 章由西北工业大学侯晏红硕士编写,第 9,10 章由西北工业大学乔生儒教授编写。全书由刘智恩副教授主编。

本书由西安交通大学周敬恩教授(第 2,6,7,8,9 章)、西安交通大学柴东朗教授(第 1,3,4,5,10 章)担任审稿。

在编写过程中,西北工业大学刘正堂教授提供了大量资料,给予了极大的支持和帮助;西安工业学院严文教授、西北工业大学李华伦、杨延清等教授审阅了部分初稿,并提出了宝贵意

见;许多有关同志参加了描图及缮写工作,对他们的辛勤劳动,在此一并致谢。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,敬请读者批评指正。

编 者

1999 年 9 月

目 录

第 1 章 工程材料中的原子排列.....	1
§ 1.1 原子键合	1
§ 1.2 原子的规则排列	6
§ 1.3 原子的不规则排列.....	22
习题	51
复习思考题	52
第 2 章 固体中的相结构	54
§ 2.1 固熔体.....	54
§ 2.2 金属间化合物.....	60
§ 2.3 陶瓷晶体相.....	63
§ 2.4 玻璃相.....	72
§ 2.5 分子相.....	73
习题	79
复习思考题	80
第 3 章 凝固	81
§ 3.1 金属结晶的基本规律.....	81
§ 3.2 金属结晶的基本条件.....	83
§ 3.3 晶核的形成.....	86
§ 3.4 晶体的长大.....	95
§ 3.5 陶瓷、聚合物的凝固.....	103
§ 3.6 凝固理论的应用	105
习题.....	109
复习思考题.....	110
第 4 章 相图.....	111
§ 4.1 相、相平衡及相图制作.....	111
§ 4.2 二元匀晶相图	113

§ 4.3	二元共晶相图	124
§ 4.4	二元包晶相图	135
§ 4.5	其他二元相图	141
§ 4.6	二元相图的分析方法	148
§ 4.7	相图的热力学解释	160
§ 4.8	铸锭(件)的组织与偏析	163
§ 4.9	三元相图	168
习题.....		188
复习思考题.....		191
第 5 章 材料中的扩散.....		193
§ 5.1	扩散定律及其应用	193
§ 5.2	扩散的微观机理	199
§ 5.3	扩散的热力学理论	203
§ 5.4	反应扩散	205
§ 5.5	一些影响扩散的重要因素	207
习题.....		209
复习思考题.....		210
第 6 章 塑性变形.....		212
§ 6.1	金属的应力-应变曲线.....	212
§ 6.2	单晶体的塑性变形	213
§ 6.3	多晶体的塑性变形	225
§ 6.4	合金的塑性变形	227
§ 6.5	冷变形金属的组织与性能	234
§ 6.6	聚合物的变形	240
§ 6.7	陶瓷材料的塑性变形	243
习题.....		246
复习思考题.....		247
第 7 章 回复与再结晶.....		248
§ 7.1	冷变形金属在加热时的变化	248
§ 7.2	回复	249
§ 7.3	再结晶	252
§ 7.4	再结晶后的晶粒长大	261
§ 7.5	金属的热变形	272
习题.....		279
复习思考题.....		280

第 8 章 固态相变..... 282

§ 8.1 固态相变的特点 282

§ 8.2 固态相变的形核 285

§ 8.3 固态相变的晶核长大 287

§ 8.4 扩散型相变示例 290

§ 8.5 无扩散型相变 295

习题..... 302

复习思考题..... 303

第 9 章 复合效应与界面..... 304

§ 9.1 材料复合、增强体及复合效应..... 304

§ 9.2 复合材料增强原理 310

§ 9.3 复合材料的界面 320

习题..... 325

复习思考题..... 326

附录..... 327

附录 A 本书所用到的物理常数 327

附录 B 有关元素资料表..... 328

附录 C 有关工程材料的性质 (20 ℃) 330

附录 D 法定计量单位..... 332

参考文献..... 335

第 1 章 工程材料中的原子排列

工程上最广泛应用的材料多为晶体,它们的许多性能都与其内部原子排列有关,因此,作为材料科学工作者,首先要熟悉固体中原子的排列方式和分布规律,其中包括固体中的原子是如何相互作用并结合起来的,晶体的特征及其描述方法,晶体结构的特点,各种晶体间的差异,以及晶体结构中缺陷的类型及性质等,这些都是本章要重点介绍的内容。这些知识不仅是学习材料科学课程的基础,也是学习其他专业课程(如 X 射线衍射、电子衍射等)必不可少的重要基础。

§ 1.1 原子键合

在固态下,当原子(离子或分子)聚集为晶体时,原子(离子或分子)之间产生较强的相互作用,这种相互作用力就称为结合力,也称为结合键。由电子运动使原子产生聚集的结合力称为化学键。固体中的结合键主要是化学键,其大小与原子的结构有关。不同类型的原子之间,具有不同性质的结合键。固体中的结合键可以分为离子键、共价键和金属键 3 种化学键,以及分子键、氢键等物理键。

§ 1.1.1 固体中原子的结合键

1.1.1.1 金属键

金属元素的原子失去最外层价电子后就变成带正电的离子,被失去的电子则形成围绕离子运动的“电子云”,如图 1-1 所示。脱离原子的价电子,已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,成为被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,使这些正离子与电子结合起来。这种结合力就是金属键。

当金属发生弯曲等变形时,原子将改变它们彼此之间的位置,但并不破坏键,因此金属具有良好的塑性。在电压作用下,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。

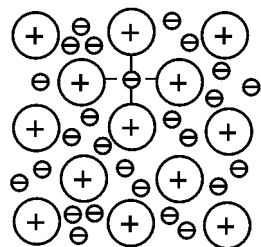


图 1-1 金属原子正常堆积时的金属键及其电子云

1.1.1.2 共价键

一些陶瓷和聚合物是通过共价键使其原子结合在一起的。

以硅为例,如图 1-2 所示。1 个 4 价的硅原子,与其周围 4 个硅原子共享最外层的电子,从而使每个硅原子最外层获得 8 个电子。1 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。

通常两个相邻原子只能共用一对电子。一个原子的共价键数,即与它共价结合的原子数,最多只能等于 $8-N$ (N 表示这个原子最外层的电子数),所以共价键具有明显的饱和性。另外,在共价晶体中,原子以一定的角度相邻接,各键之间有确定的方位,故共价键有着强烈的方向性。

共价键的结合力很大,所以共价晶体具有强度高、硬度大、脆性大、熔点高等性质,结构也比较稳定。受力时要么不变形,要么键被破坏使材料破坏和断裂。

1. 1. 1. 3 离子键

部分陶瓷材料 (如 MgO , Al_2O_3 , ZrO_2 等) 是依靠离子键将原子堆积排列在一起。在周期表 (见表 1-1) 中,当相隔较远的一正电性元素原子和一负电性元素原子接触时,前者失去最外层价电子变成带正电荷的正离子,后者获得电子变成带负电荷的满壳层负离子。正离子和负离子由于静电引力相互吸引,当它们充分接触时会产生排斥,引力和斥力相等时即形成稳定的离子键。

氯化钠晶体是靠离子键结合的晶体,如图 1-3 所示。图中表明,Na 的外层电子贡献给 Cl,Na 变为带正电的离子,而内层电子数为 8,是满层电子数;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 Na 原子和 1 个 Cl 原子依正负离子间的吸引力而结合在一起。

离子键的结合力很大,所以离子晶体的硬度高,强度大,热膨胀系数小,但脆性大。离子键中很难产生可以自由运动的电子,故离子晶体都是良好的绝缘体。

1. 1. 1. 4 分子键 (范德瓦尔斯力)

有些物质,如塑料、陶瓷等,它们的分子或原子团往往具有极性,即分子中的一部分带正电,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尔斯力。这种存在于中性原子或分子之间的结合力称为分子键。如高分子材料聚氯乙烯,是由 C, H, Cl 构成的大分子,如图 1-4 (a) 所示。图中一个大分子链的内部,如 C—C 原子之间,主要由共价键结合,而两侧的 H 原子带正电,也可以是 Cl 原子并带负电。在两个大分子链之间,带正电的 H 原子和带负电的 Cl 原子,存在着微弱的静电引力,即为范德瓦尔斯力。

由于范德瓦尔斯力很弱,分子晶体的结合力很小,因此在外力作用下,易产生滑动并造成很大的变形,见图 1-4(b)。分子晶体熔点很低,硬度也很低。这种引力在其他化学键晶体中也可以存在,但常被忽略不计。

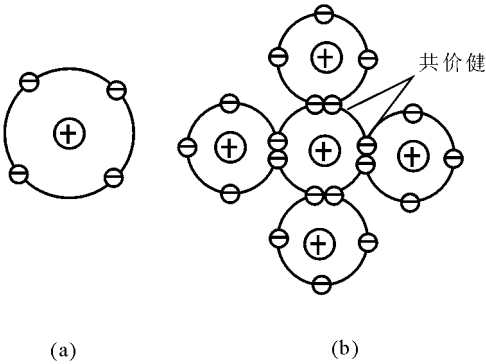


图 1-2 硅的共价键
(a) 硅原子; (b) 硅的 4 个共价键

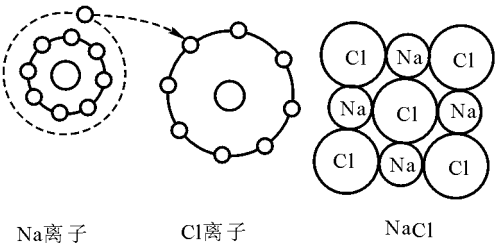


图 1-3 NaCl 的离子键

表 1—1 元素周期表

周期	I A	1																	0	电子层数
1	H 氢	1s ¹ 1.00794(7)																	He 氦	2 1s ² 4.002602(2)
2	Li 锂	2s ¹ 6.941(2)																	Ne 氖	10 2s ² 2p ⁶ 20.1797(6)
3	Na 钠	3s ¹ 22.989770(2)																	Ar 氩	18 3s ² 3p ⁶ 39.948(1)
4	K 钾	4s ¹ 39.0983(1)																	Kr 氪	36 4s ² 4p ⁶ 83.80(1)
5	Rb 铷	5s ¹ 85.4678(3)																	Xe 氙	54 5s ² 5p ⁶ 131.29(2)
6	Cs 铯	6s ¹ 132.90545(2)																	Rn 氡	86 6s ² 6p ⁶ 222
7	Fr 钫	7s ¹ 223																		

注:

1. 原子量录自1997年国际原子量表,以¹²C=12为基准。原子量单位位,的准确程度加在其后括号内位。

2. 商品Li的原子量范围为6.94~6.99。

元素名称

注: *的是人造元素

外围电子的构造

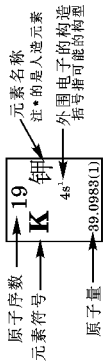
括号中可能的构型

原子序数	19	钾
元素符号	K	4s ¹
原子量	39.0983(1)	

II A	2																	
4	Be 铍	2s ²																
11	Mg 镁	3s ²																
19	Ca 钙	4s ²																
38	Sr 锶	5s ²																
56	Ba 钡	6s ²																
88	Ra 镭	7s ²																
104	Lr 镥	5f ¹⁴ 7s ²																
112	Cn 鎶	7s ²																

III B	IV B	V B	VB	VI B	VII B	VIII	I B	II B																			
21	Sc 钪	3d ¹ 4s ²	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36											
39	Y 钇	4d ¹ 5s ²	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54										
71	La 镧	5d ¹ 6s ²	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86										
89	Ac 锕	6d ¹ 7s ²	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104										
105	Db 𨭎	6d ³ 7s ²	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120										
121	Uut 鰐	7p ¹ 8s ²	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136										
137	Uuh 𨭭	7p ³ 8s ²	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152										
153	Ubu 𨭻	8p ¹ 9s ²	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168										
173	Ubu 𨭻	9p ¹ 10s ²	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188										
189	Ubu 𨭻	10p ¹ 11s ²	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204										
217	Ubu 𨭻	11p ¹ 12s ²	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232										
232	Ubu 𨭻	12p ¹ 13s ²	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247										
257	Ubu 𨭻	13p ¹ 14s ²	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272										
289	Ubu 𨭻	14p ¹ 15s ²	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304										
311	Ubu 𨭻	15p ¹ 16s ²	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326										
337	Ubu 𨭻	16p ¹ 17s ²	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352										
359	Ubu 𨭻	17p ¹ 18s ²	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374										
381	Ubu 𨭻	18p ¹ 19s ²	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396										
405	Ubu 𨭻	19p ¹ 20s ²	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420										
433	Ubu 𨭻	20p ¹ 21s ²	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448										
457	Ubu 𨭻	21p ¹ 22s ²	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472										
481	Ubu 𨭻	22p ¹ 23s ²	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496										
509	Ubu 𨭻	23p ¹ 24s ²	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524										
537	Ubu 𨭻	24p ¹ 25s ²	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552										
561	Ubu 𨭻	25p ¹ 26s ²	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576										
585	Ubu 𨭻	26p ¹ 27s ²	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600										
609	Ubu 𨭻	27p ¹ 28s ²	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624										
633	Ubu 𨭻	28p ¹ 29s ²	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648										
657	Ubu 𨭻	29p ¹ 30s ²	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672										
681	Ubu 𨭻	30p ¹ 31s ²	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696										
705	Ubu 𨭻	31p ¹ 32s ²	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720										
729	Ubu 𨭻	32p ¹ 33s ²	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744										
753	Ubu 𨭻	33p ¹ 34s ²	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768										
777	Ubu 𨭻	34p ¹ 35s ²	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792										
801	Ubu 𨭻	35p ¹ 36s ²	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816										
825	Ubu 𨭻	36p ¹ 37s ²	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840										
849	Ubu 𨭻	37p ¹ 38s ²	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864										
873	Ubu 𨭻	38p ¹ 39s ²	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888										
897	Ubu 𨭻	39p ¹ 40s ²	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912										
921	Ubu 𨭻	40p ¹ 41s ²	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936										
945	Ubu 𨭻	41p ¹ 42s ²	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960										
969	Ubu 𨭻	42p ¹ 43s ²	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984										
993	Ubu 𨭻	43p ¹ 44s ²	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008										
1017	Ubu 𨭻	44p ¹ 45s ²	1018	1019	1020	1021	1022	1023	1024	1025	1026	1027	1028	1029	1030	1031	1032										
1041	Ubu 𨭻	45p ¹ 46s ²	1042	1043	1044	1045	1046	1047	1048	1049	1050	1051	1052	1053	1054	1055	1056										
1065	Ubu 𨭻	46p ¹ 47s ²	1066	1067	1068	1069	1070	1071	1072	1073	1074	1075	1076	1077	1078	1079	1080										
1089	Ubu 𨭻	47p ¹ 48s ²	1090	1091	1092	1093	1094	1095	1096	1097	1098	1099	1100	1101	1102	1103	1104										
1113	Ubu 𨭻	48p ¹ 49s ²	1114	1115	1116	1117	1118	1119	1120	1121	1122	1123	1124	1125	1126	1127	1128										
1137	Ubu 𨭻	49p ¹ 50s ²	1138	1139	1140	1141	1142	1143	1144	1145	1146	1147	1148	1149	1150	1151	1152										
1161	Ubu 𨭻	50p ¹ 51s ²	1162	1163	1164	1165	1166	1167	1168	1169	1170	1171	1172	1173	1174	1175	1176										
1185	Ubu 𨭻	51p ¹ 52s ²	1186	1187	1188	1189	1190	1191	1192	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200										
1209	Ubu 𨭻	52p ¹ 53s ²	1210	1211	1212	1213	1214	1215	1216	1217	1218	1219	1220	1221	1222	1223	1224										
1233	Ubu 𨭻	53p ¹ 54s ²	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240	1241	1242	1243	1244	1245	1246	1247	1248										
1257	Ubu 𨭻	54p ¹ 55s ²	1258	1259	1260	1261	1262	1263	1264	1265	1266	1267	1268	1269	1270	1271	1272										
1281	Ubu 𨭻	55p ¹ 56s ²	1282	1283	1284	1285	1286	1287	1288	1289	1290	1291	1292	1293	1294	1295	1296										
1305	Ubu 𨭻	56p ¹ 57s ²	1306	1307	1308	1309	1310	1311	1312	1313	1314	1315	1316	1317	1318	1319	1320										
1329	Ubu 𨭻	57p ¹ 58s ²	1330	1331	1332	1333	1334	1335	1336	1337	1338	1339	1340	1341	1342	1343	1344										
1353	Ubu 𨭻	58p ¹ 59s ²	1354	1355	1356	1357	1358	1359	1360	1361	1362	1363	1364	1365	1366	1367	1368										
1377	Ubu 𨭻	59p ¹ 60s ²	1378	1379	1380	1381	1382	1383	1384	1385	1386	1387	1388	1389	1390	1391	1392										
1401	Ubu 𨭻	60p ¹ 61s ²	1402	1403	1404	1405	1406	1407	1408	1409	1410	1411	1412	1413	1414	1415	1416										
1425	Ubu 𨭻	61p ¹ 62s ²	1426	1427	1428	1429	1430	1431	1432	1433	1																

注：1.原子量录自1997年国际原子量表，以¹²C=12为基准。原子量末位数的准确程度加注在其后括号内。
2.商品Li的原子量范围为6.94~6.99。



镧系	57 La 镧	58 Ce 铈	59 Pr 镨	60 Nd 钕	61 Pm 钷	62 Sm 钐	63 Eu 铕	64 Gd 钆	65 Tb 铽	66 Dy 镝	67 Ho 钬	68 Er 铒	69 Tm 铥	70 Yb 镱	71 Lu 镥
锕系	89 Ac 锕	90 Th 钍	91 Pa 镤	92 U 铀	93 Np 镎	94 Pu 钚	95 Am 镅	96 Cm 锔	97 Bk 锫	98 Cf 锎	99 Es 锿	100 Fm 镆	101 Md 镎	102 No 锘	103 Lr 铹

1.1.1.5 氢键

在含氢的物质中,分子都是通过极性共价键结合,而原子之间则是通过氢键连接的。氢键的产生主要是由于氢原子与某一原子形成共价键时,共有电子向这个原子强烈偏移,使氢原子几乎变成一半径很小的带正电荷的核,而这个氢原子还可以和另一个原子相吸引,形成附加的键,因此氢键是一种较强的、有方向性的范德瓦尔斯键。氢键的结合力比离子键、共价键等小得多。

以上简单地讨论了结合键的类型及其本质。表 1-2 列出了各种结合键的主要特点及实例。

表 1-2 各种结合键的比较

结合键类型	实 例	结 合 能		主 要 特 征
		kcal/mol*	eV/mol	
离子	LiCl	199	8.63	非方向键,高配位数,低温不导电,高温离子导电
	NaCl	183	7.94	
	KCl	166	7.20	
	RbCl	159	6.90	
共价	金刚石	170	1.37	空间方向键,低配位数,纯晶体在低温下导电率很小
	Si	108	1.68	
	Ge	89	3.87	
	Sn	72	3.11	
金属	Li	37.7	1.63	非方向键,配位数及密度都极高,导电率高,延性好
	Na	25.7	1.11	
	K	21.5	0.931	
	Rb	19.6	0.852	
分子	Ne	0.46	0.020	低的熔点和沸点,压缩系数大,保留了分子的性质
	Ar	1.79	0.078	
	Kr	2.67	0.116	
	Xe	3.92	0.170	
氢键	H ₂ O(冰)	12	0.52	结合力高于无氢键的类似分子
	HF	7	0.30	

* 1 kcal=4.18 kJ。

从以上讨论可以看出,金属键、共价键和离子键都涉及原子外层电子的重新分布,这些电子在键合后不再仅仅属于原来的原子,故这 3 种键都称为化学键。相反,在形成分子键和氢键时,原子的外层电子分布没有变化或变化极小,它们仍然属于原来的原子,故把这两种键称为物理键。一般来说,化学键最强,氢键次之,分子键最弱。

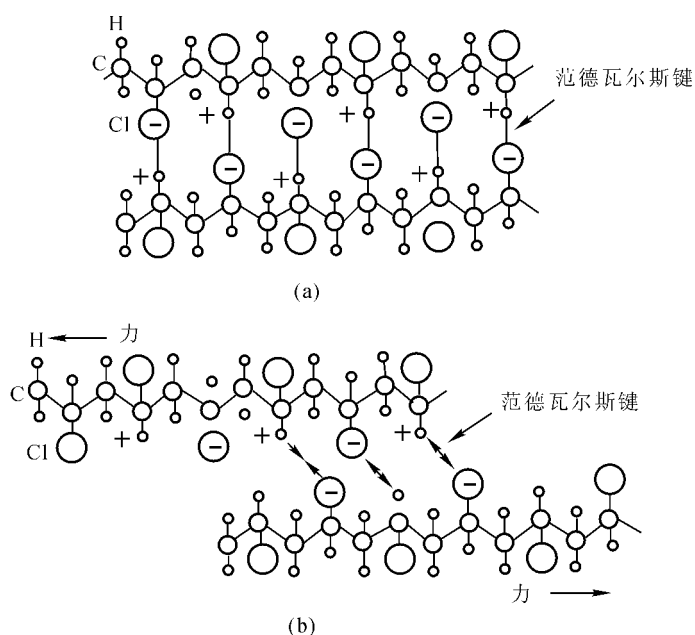


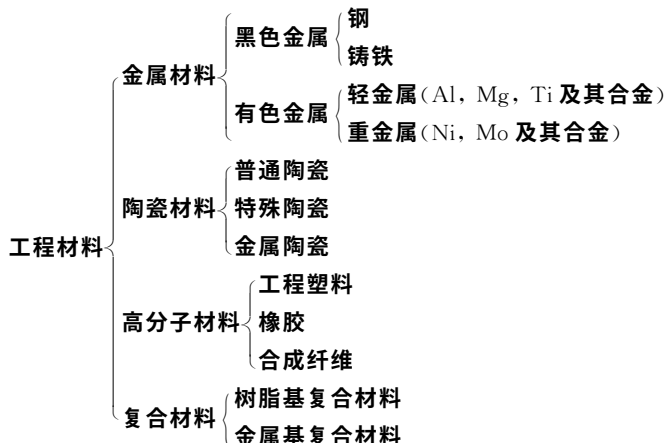
图 1-4 聚氯乙烯中的结合键

(a) 聚氯乙烯中的范德瓦尔斯键； (b) 聚氯乙烯受力后易变形

§ 1.1.2 工程材料的分类

固体材料可以有各种不同的分类方法。工程上主要根据固体中结合键的特点或本性进行分类。主要用于制作结构、机件和工具等的固体材料称为工程材料,它可分为金属材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料四大类,如表 1-3 所示。

表 1-3 工程材料的分类



在这四类工程材料中,金属材料应用面最广、用量最大、承载能力最高。有色金属中的轻合金在航空工业中有着特别重要的意义。

陶瓷材料是指硅酸盐、金属同非金属元素的化合物,如氧化物、氮化物等。工业上用的陶瓷材料可分为三类: