

刘智恩 主编

Materials Science

高等学校教材 · 材料科学与工程

材料科学基础 (第4版)

MATERIALS
SCIENCE &
ENGINEERING
TEXTBOOKS

HIGHER
EDUCATION

西北工业大学出版社

高等学校教材·材料科学与工程

材料科学基础

(第4版)

刘智恩 主编

西北工業大學出版社

【内容简介】 本书阐述了与工程材料有关的基本理论及应用,包括晶体学基础、晶体缺陷理论、材料中的相结构、凝固理论、相平衡及相图、固体中的扩散、塑性变形、回复与再结晶、固态相变和材料复合原理等,并介绍了材料科学发展的新领域、新思维、新方法和新成果。作为教材,本书的主要特点是难度适中,重点突出;以工程材料为对象,阐述其共性原理;强调工程实践,联系生产实际;编写了较多的例题,便于自学。

本书可作为材料成型及控制、材料学、复合材料及腐蚀与防护等专业的教科书及考研参考书,也可用作相关工程技术人员的参考书。

材料科学基础

图书在版编目(CIP)数据

材料科学基础/刘智恩主编. —4版. —西安:西北工业大学出版社,2013.9
ISBN 978-7-5612-3823-3

I. ①材… II. ①刘… III. ①材料科学 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 217026 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路127号 邮编:710072

电话:(029)88493844 88491757

网址:www.nwpup.com

印刷者:兴平市博闻印务有限公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:22.25

字数:535千字

版次:2013年9月第4版

2013年9月第1次印刷

定价:40.00元

第4版前言

《材料科学基础》自第1版问世以来,得到广大读者的认同,不少高等学校把该书作为基本教材或者考研参考书。对此,我们感到很欣慰,也由衷地感谢广大读者。

本次修订再版,是基于以下考虑:

第一,材料科学发展的新领域、新思维、新方法应使学生有所了解。如当前对超材料的研究非常活跃,但它与传统材料的“成分—结构—性能—运用”的模式完全不同;超材料是逆向思维,即“性能—人工结构(定制设计)—运用”。这是材料领域革命性的变革。超材料突破了自然界材料的化学键和分子结构的固定框架,超越了自然界材料的极限。

第二,材料科学发展的新成果应使学生及时了解。20世纪80年代以前,科学界对固态物质的认识仅限于晶体与非晶体。随着对物质结构的深入研究,徘徊在晶体与非晶体之间的“准晶体”已被人们接受。

第三,材料科学基础理论上的发展,如对材料现代热力学、非平衡定态相图等方面的研究,也应及时反映在教材中。

我们认为,对教材的不断更新和完善,有利于开拓学生的视野,培养学生的创新意识,以及独立思考和勇于实践的能力。然而,由于涉及材料科学发展的前沿,对有些问题的看法不尽一致,所以,书中不妥之处,敬请读者批评指正。

2013年7月

参 考

目 录

第3版前言

本书《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,我们再次修订出版该教材。

本次修订的主导思想,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,而且有助于提高学生分析问题和解决问题的能力。

在教材编写上,力求做到简明扼要,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。

在本书的修订过程中,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

材料是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($(3\sim 4)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),良好的高温温度(当前可达 1400°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,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,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。因此,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,本书与传统的《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。

本书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。

本书授课时数为80学时左右。使用本书之前,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。

根据这几年本书的使用情况,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。

在本书的修订过程中,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

(1) 金属材料 (2) 无机非金属材料 (3) 复合材料 (4) 高分子材料

(5) 金属材料 (6) 无机非金属材料 (7) 复合材料 (8) 高分子材料

(9) 金属材料 (10) 无机非金属材料 (11) 复合材料 (12) 高分子材料

(13) 金属材料 (14) 无机非金属材料 (15) 复合材料 (16) 高分子材料

第 1 版前言

前言

1999 年 9 月

为了适应材料科学的发展,拓宽知识面,加强基础,同时考虑到按大类招生、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。

本书授课时数为 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

由于水平有限,书中难免存在缺点和错误,敬请读者批评指正。

1999 年 9 月

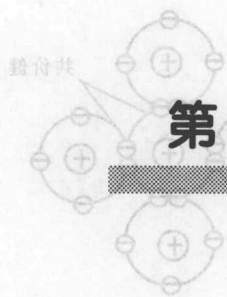
— 2 —

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
1.4 准晶体	51
习题	52
复习思考题	54
第 2 章 材料中的相结构	55
2.1 固熔体	55
2.2 金属间化合物	61
2.3 陶瓷晶体相	64
2.4 玻璃相	73
2.5 分子相	74
2.6 人工结构	80
习题	82
复习思考题	82
第 3 章 凝固	83
3.1 金属结晶的基本规律	83
3.2 金属结晶的基本条件	85
3.3 晶核的形成	88
3.4 晶体的长大	97
3.5 陶瓷、聚合物的凝固	105
3.6 凝固理论的应用	107
习题	111
复习思考题	112

第4章 相图	113
4.1 相、相平衡及相图制作	113
4.2 二元匀晶相图	116
4.3 二元共晶相图	127
4.4 二元包晶相图	138
4.5 其他二元相图	144
4.6 二元相图的分析方法	151
4.7 相图的热力学解释	163
4.8 铸锭(件)的组织与偏析	166
4.9 三元相图	171
4.10 非平衡定态相图	191
习题	194
复习思考题	197
第5章 材料中的扩散	199
5.1 扩散定律及其应用	199
5.2 扩散的微观机理	205
5.3 扩散的热力学理论	209
5.4 反应扩散	211
5.5 一些影响扩散的重要因素	213
习题	215
复习思考题	216
第6章 塑性变形	218
6.1 金属的应力-应变曲线	218
6.2 单晶体的塑性变形	219
6.3 多晶体的塑性变形	231
6.4 合金的塑性变形	233
6.5 冷变形金属的组织与性能	240
6.6 聚合物的变形	246
6.7 陶瓷材料的塑性变形	249
习题	252
复习思考题	253
第7章 回复与再结晶	254
7.1 冷变形金属在加热时的变化	254
7.2 回复	255
7.3 再结晶	258

7.4 再结晶后的晶粒长大	267
7.5 金属的热变形	278
习题	285
复习思考题	286
第8章 固态相变	288
8.1 固态相变的特点	288
8.2 固态相变的形核	291
8.3 固态相变的晶核长大	293
8.4 扩散型相变示例	296
8.5 无扩散型相变	301
8.6 贝氏体型相变	308
习题	309
复习思考题	310
第9章 复合效应与界面	311
9.1 材料复合、增强体及复合效应	311
9.2 复合材料增强原理	317
9.3 复合材料的界面	327
习题	332
复习思考题	333
附录	334
附录 A 本书所用到的物理常数	334
附录 B 有关元素资料表	335
附录 C 有关工程材料的性质 (20 °C)	337
附录 D 法定计量单位	339
参考文献	342



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、共价键和金属键三种化学键,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,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。

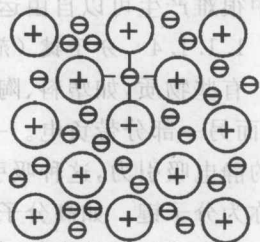


图 1-1 金属原子正常堆积时的金属键及其电子云

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。

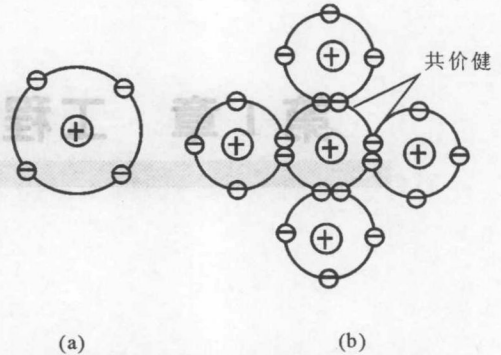


图 1-2 硅的共价键

(a) 硅原子; (b) 硅的 4 个共价键

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。

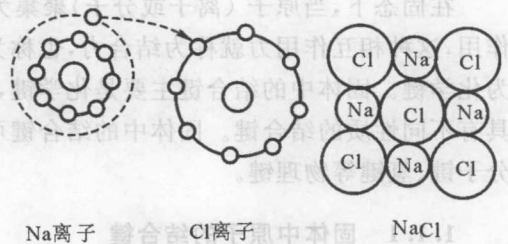


图 1-3 NaCl 的离子键

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,所以在外力作用下,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。

表1—1 元素周期表

周期	I A	1	II A	2	III A	13	IV A	14	V A	15	VIA	16	VII A	17	0	电子层数
1	H	1s ¹	He	1s ²											He	1s ²
2	Li	2s ¹	Be	2s ²	B	2s ² 2p ¹	C	2s ² 2p ²	N	2s ² 2p ³	O	2s ² 2p ⁴	F	2s ² 2p ⁵	Ne	2s ² 2p ⁶
3	Na	3s ¹	Mg	3s ²	Al	3s ² 3p ¹	Si	3s ² 3p ²	P	3s ² 3p ³	S	3s ² 3p ⁴	Cl	3s ² 3p ⁵	Ar	3s ² 3p ⁶
4	K	4s ¹	Ca	4s ²	Sc	3d ¹ 4s ²	Ti	3d ² 4s ²	V	3d ³ 4s ²	Cr	3d ⁵ 4s ¹	Mn	3d ⁵ 4s ²	Fe	3d ⁶ 4s ²
5	Rb	5s ¹	Sr	5s ²	Y	4d ¹ 5s ²	Zr	4d ² 5s ²	Nb	4d ⁴ 5s ¹	Mo	4d ⁵ 5s ¹	Tc	4d ⁵ 5s ²	Ru	4d ⁷ 5s ¹
6	Cs	6s ¹	Ba	6s ²	La	5d ¹ 6s ²	Hf	5d ² 6s ²	Ta	5d ³ 6s ²	W	5d ⁴ 6s ²	Re	5d ⁵ 6s ²	Os	5d ⁶ 6s ²
7	Fr	7s ¹	Ra	7s ²	Ac	6d ¹ 7s ²	Rf	6d ² 7s ²	Db	6d ³ 7s ²	Sg	6d ⁴ 7s ²	Bh	6d ⁵ 7s ²	Hs	6d ⁶ 7s ²

注：
1. 原子量取自1907年国际原子量表，以¹²C=12为基准，原子量未位数的准确度加在其后括号内。
2. 商品L的原子量范围为6.94~6.99。

原子序数——19
元素符号——K
元素名称——钾
注：* 的是人造元素
——* 是人工合成元素
——* 是人工合成元素
——* 是人工合成元素

57	La	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Lu	69	Er	70	Tm	71	Yb
57	La	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Lu	69	Er	70	Tm	71	Yb
89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr
89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr

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,故这三种键都称为化学键。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。

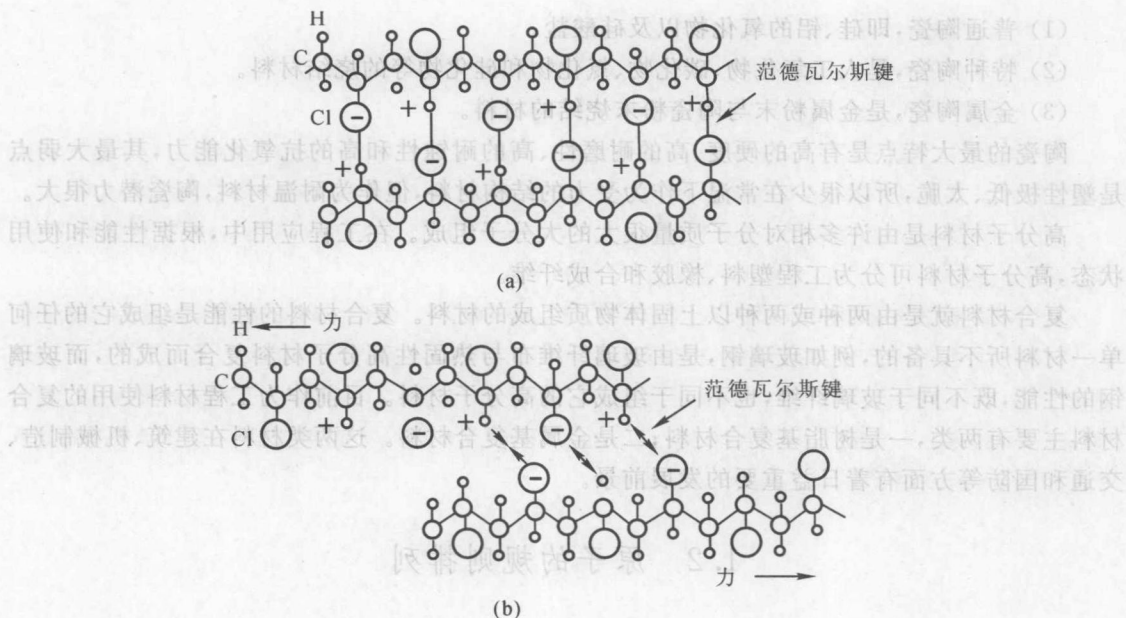


图 1-4 聚氯乙烯中的结合键

(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

		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
小	大					小	大	
10	20	金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料	10	20	Cu
20	30					20	30	Al-Mg
30	40					30	40	Mg
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料	复合材料			类
		金属材料	陶瓷材料	高分子材料				