

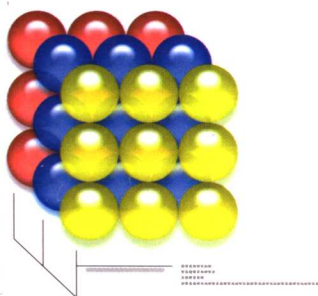
高等学校教材 · 材料科学系列

MATERIAL SCIENCE TEXTBOOKS FOR HIGHER EDUCATION

Material Science

材料科学基础

(第3版)



刘智恩 主编

西北工业大学出版社

TB3/126

2003

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

【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、固体中的相结构、凝固理论、相图、固体中的扩散、塑性变形、回复与再结晶、固态相变、材料复合原理等内容。本书的主要特点是以工程材料为对象,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、习题,便于自学,有利于对基础知识的理解和掌握。

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、锻造以及腐蚀与防护等专业的教科书,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP)数据

材料科学基础/刘智恩主编.—3版.—西安:西北工业大学出版社,2007.9
ISBN 978-7-5612-1241-7

I. 材… II. 刘… III. 材料科学 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000)第 22250 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:陕西向阳印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:22

字 数:524 千字

版 次:2007 年 9 月第 3 版 2007 年 9 月第 1 次印刷

定 价:30.00 元

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 李森泉

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($(3\sim 4)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),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。

編者

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。

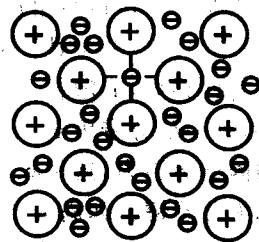


图 1-1 金属原子正常堆积时的金属键及其电子云

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。

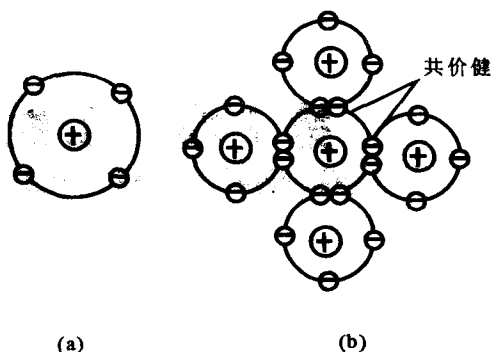


图 1-2 硅的共价键

(a) 硅原子; (b) 硅的 4 个共价键

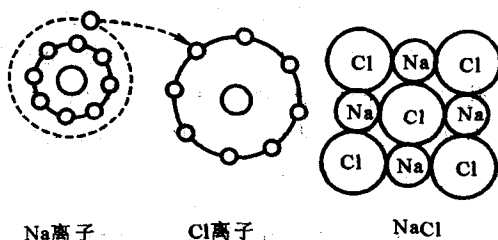


图 1-3 NaCl 的离子键

表1—1 元素周期表

周期	I A	II A	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII	IX	X	IB	II B	III A	IV A	V A	VIA	VIA	VIA	0											
1	H ^{1s}	He ^{1s²}																	0											
2	Li ^{2s¹}	Be ^{2s²}											B ^{2s² 2p¹}	C ^{2s² 2p²}	N ^{2s² 2p³}	O ^{2s² 2p⁴}	F ^{2s² 2p⁵}	Ne ^{2s² 2p⁶}	2											
3	Na ^{3s¹}	Mg ^{3s²}											Al ^{3s² 3p¹}	Si ^{3s² 3p²}	P ^{3s² 3p³}	S ^{3s² 3p⁴}	Cl ^{3s² 3p⁵}	Ar ^{3s² 3p⁶}	10											
4	K ^{4s¹}	Ca ^{4s²}											Sc ^{3d¹ 4s²}	Ti ^{3d² 4s²}	V ^{3d³ 4s²}	Cr ^{3d⁵ 4s¹}	Mn ^{3d⁵ 4s²}	Fe ^{3d⁶ 4s²}	Co ^{3d⁷ 4s²}	Ni ^{3d⁸ 4s²}	Cu ^{3d¹⁰ 4s¹}	Zn ^{3d¹⁰ 4s²}	Ga ^{4s² 4p¹}	Ge ^{4s² 4p²}	As ^{4s² 4p³}	Se ^{4s² 4p⁴}	Br ^{4s² 4p⁵}	Kr ^{4s² 4p⁶}	36	
5	Rb ^{5s¹}	Sr ^{5s²}											Y ^{4d¹ 5s²}	Zr ^{4d² 5s²}	Nb ^{4d⁴ 5s¹}	Mo ^{4d⁵ 5s¹}	Tc ^{4d⁵ 5s²}	Ru ^{4d⁷ 5s¹}	Rh ^{4d⁸ 5s¹}	Pd ^{4d¹⁰ 5s⁰}	Ag ^{4d¹⁰ 5s¹}	Cd ^{4d¹⁰ 5s²}	In ^{5s² 5p¹}	Sn ^{5s² 5p²}	Sb ^{5s² 5p³}	Te ^{5s² 5p⁴}	I ^{5s² 5p⁵}	Xe ^{5s² 5p⁶}	54	
6	Cs ^{6s¹}	Ba ^{6s²}											La ^{5d¹ 6s²}	Ce ^{5d¹ 6s²}	Pr ^{5d¹ 6s²}	Nd ^{5d¹ 6s²}	Pm ^{5d⁴ 6s²}	Sm ^{5d⁶ 6s²}	Eu ^{5d⁶ 6s²}	Gd ^{5d⁷ 6s²}	Tb ^{5d⁷ 6s²}	Dy ^{5d⁷ 6s²}	Ho ^{5d⁹ 6s²}	Er ^{5d¹⁰ 6s²}	Tm ^{5d¹⁰ 6s²}	Yb ^{5d¹⁰ 6s²}	Lu ^{5d¹⁰ 6s²}	80		
7	Fr ^{7s¹}	Ra ^{7s²}											Ac ^{6d¹ 7s²}	Th ^{6d² 7s²}	Pa ^{6d³ 7s²}	U ^{6d³ 7s²}	Np ^{6d⁴ 7s²}	Pu ^{6d⁶ 7s²}	Am ^{6d⁷ 7s²}	Cm ^{6d⁸ 7s²}	Bk ^{6d⁹ 7s²}	Cf ^{6d¹⁰ 7s²}	Es ^{6d¹⁰ 7s²}	Fm ^{6d¹⁰ 7s²}	Md ^{6d¹⁰ 7s²}	No ^{6d¹⁰ 7s²}	Po ^{6d¹⁰ 7s²}	At ^{6d¹⁰ 7s²}	Rn ^{6d¹⁰ 7s²}	118

原子序数 → 19
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外圈电子的构造
括号指可能的构型

原子序数 → 39
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注：*的是人造元素
外

注: 1.原子量取自1997年国际原子量表,以¹²C=12为基准。原子量未位数的准确度加注在其后括号内。
2.商品上的原子量范围为6.94~6.99。

原子序数 → 19 钾
元素符号 → K
元素名称 → 钾
注: * 的为人造元素
外圈电子的构造
和符号可参看附表