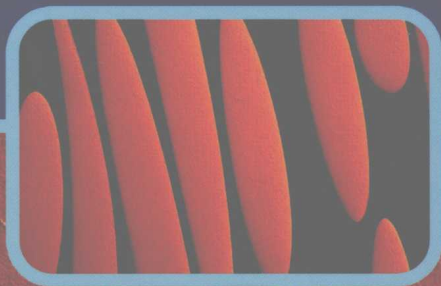



第2版

机械工程材料

JIXIE GONGCHENG CAILIAO

文九巴 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

机 械 工 程 材 料

第 2 版

主 编 文九巴
副主编 负自均 李安铭
编写人 文九巴 负自均
李安铭 王利国
田保红



机 械 工 业 出 版 社

本书是根据高等院校机械类冷加工各专业工程材料课程的基本要求编写的试用教材。

本书从机械类各专业学生实际需要出发,介绍了常用机械工程材料及其应用,主要包括:材料的结构和金属的结晶;金属的塑性变形与再结晶;材料的力学性能;二元合金相图;铁碳合金;钢的热处理;合金钢;铸铁;非铁(有色)金属及其合金;机械零件选材及工艺路线分析;非金属机械工程材料(包括高分子材料、工程塑料、橡胶材料、工程陶瓷材料、复合材料)等。书末附录介绍了常用力学性能指标及硬度试验方法,金属硬度及其与强度的换算以及国内外常用钢材牌号。本书在选材方面注重联系实际,反映材料科学的新近成果。书中的相关内容也采用了新的国家标准。

本书可作为高等院校机械类或近机类冷加工各专业使用的教材,也可供专业技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料/文九巴主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2009.7

ISBN 978-7-111-27640-1

I. 机… II. 文… III. 机械制造材料 IV. TH14

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第117007号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:张秀恩 版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:马精明 责任印制:邓博

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2009年8月第2版第1次印刷

169mm×239mm·23.25印张·448千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-27640-1

定价:36.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379770

封面无防伪标均为盗版

第2版前言

本书自2002年出版以来,已先后印刷6次,共计17000册,被国内多所高等院校选用,这表明它在我国高校有关专业教学中已得到了广泛认同。6年来的教学实践表明,本书的总体结构和内容深浅程度是合适的,但也存在一些问题,根据师生们提出的意见和建议,对本书进行修订再版。

“机械工程材料学”是机械类或近机类冷加工专业专门讲述机械工程材料的唯一课程。该课程使学生通过了解机械工程材料,特别是金属材料的基本理论,学会合理选用金属材料、正确选用热处理工艺方法,能够将材料的成分-工艺-组织-性能-应用有机地结合起来,同时对非金属工程材料有一定的了解。因此,从实用的角度、便于学生学习的角度出发,适当调整不同章节的内容顺序、增加实际生产工艺例子、适当增加必要的內容。本次修订是在原教材的基础上进行了必要的修改和补充,原结构体系基本不变,以保持其科学性、先进性和实用性。

本书这次修订的主要内容有以下几点:

1) 适当充实高分子材料和陶瓷材料内容:第一章将淡化“金属”的晶体结构,以材料的结构和金属的结晶为主线,增加离子键、共价键、分子键、非晶体等内容,将合金的相结构、合金的组织放入本章。

2) 增加材料力学性能内容,放在第三章。

3) 适当压缩合金的结晶过程内容:该内容涉及第三章和第四章。

4) 修改 Fe-Fe₃C 相图内容,将相组成相图和组织组成相图分开介绍。

5) 适当增加材料科学的前沿性成果,使学生对材料科学的发展前沿有所了解,如在第八章新型及特种材料部分增加纳米碳管等新的材料科学成果。

以上修订内容由河南科技大学“机械工程材料学”课程组负责完成,增添的第三章由文九巴、李安铭编写。第一章修订由河南科技大学朱利敏完成,第五章、第六章修订由河南科技大学宁向梅完成,第七章修订由河南科技大学王长生完成,河南科技大学王顺兴教授参加修改讨论,并提出了具体意见和建议。

虽然我们在修订中作了努力,但错误和不当之处仍然难免,请读者继续提出宝贵意见。

河南科技大学 文九巴

2009年5月

第1版前言

《机械工程材料》是机械类冷加工各专业的一门重要技术基础课。近年来，由于学科调整、专业改造、教学计划变更等，使得该课程的教学情况发生了变化，而且随着材料科学的发展，许多新的研究成果也需不断充实到该课程的教材中，为此我们重新编写了《机械工程材料》以适应新形势下的教学要求。

本书从机械工程材料的应用角度出发，以培养机械制造冷加工各专业的学生具有合理选用金属材料、正确选定热处理工艺方法、妥善安排工艺路线的初步能力，了解非金属材料及其在机械工程方面的应用为主要目标。

本书内容包括：金属学、热处理、金属材料、失效分析与选材以及非金属工程材料等。主要讲述：金属材料的结构、成分、组织与性能、加工工艺之间的关系；钢铁材料热处理的基本原理和工艺及其在机械构件上的应用；常用金属材料（碳钢、合金钢、铸铁、非铁（有色）金属及合金、硬质合金等）的分类、编号、成分、组织结构、性能及用途；金属材料的选用原则；机械设计对金属材料及热处理的技术要求；机械零件的失效分析；非金属材料（高分子材料、工程陶瓷、复合材料等）的基本性质及其工程应用等。

本书内容分为两部分（金属材料、非金属材料），适用学时数约50~70学时，各校在使用时可根据专业要求和具体情况进行删减或补充。

本书从机械工业实际出发，内容安排力图更好满足教学要求，以金属材料为主，兼顾非金属工程材料，并补充了有关新材料的内容。书中涉及的材料牌号、成分和性能，以及中外牌号对照采用了新的国家标准。计量单位统一采用国际单位制（SI），并以国际代号表示。

参加本书编写的有河南科技大学文九巴（绪论、第四章、第六章）、河南科技大学负自均（第五章、第九章）、河南理工大学李安铭（第一章、第七章、第八章）、郑州大学王利国（第二章、第三章、附录）、河南科技大学田保红（第十章、第十一章、第十二章）。河南科技大学王长生为本书提供了部分金相照片。本书在编写过程中，曾得到许多有关同志的热忱帮助和支持，在此谨表示衷心感谢。

本书由杨蕴林教授主审，杨教授认真审阅了全书内容并提出了许多具体意见和建议，在此致谢。

由于我们水平有限，加之时间仓促，书中一定存在不少缺点和错误，恳请广大读者提出宝贵意见。

编者

2002年4月

目 录

第 2 版前言

第 1 版前言

绪论 1

第一章 材料的结构和金属的结

晶 4

第一节 晶体结构和非晶体 4

一、原子的结合键及其特性 4

二、晶体和非晶体概念 6

三、非晶体结构 6

四、晶体结构的基本概念 7

五、金属中常见的三种晶体结构 8

六、三种典型晶格的致密度及晶

面晶向分析 9

七、单晶体的各向异性与多晶体

的伪各向同性 12

第二节 晶体缺陷 13

一、点缺陷 13

二、线缺陷 14

三、面缺陷 14

第三节 合金的相结构 15

一、基本概念 15

二、固溶体 16

三、化合物 18

第四节 合金的组织 21

一、组织的概念 21

二、单相组织 22

三、双相组织 22

四、多相组织 23

第五节 金属的结晶与铸锭 23

一、概述 24

二、晶核的形成与长大 25

三、结晶后晶粒大小及控制 27

四、金属铸锭的组织 28

第二章 金属的塑性变形与再

结晶 32

第一节 金属的塑性变形 32

一、金属变形的三个阶段 32

二、单晶体的塑性变形 33

三、多晶体的塑性变形 36

第二节 塑性变形对金属组织和

性能的影响 38

一、塑性变形对显微组织的影

响 38

二、塑性变形对金属性能的影

响 40

三、残余应力 41

第三节 回复与再结晶 42

一、回复 42

二、再结晶 42

三、晶粒长大 45

四、影响再结晶退火后晶粒度的

因素 45

第四节 金属的热加工 47

一、金属的热加工与冷加工 47

二、热加工对金属组织和性能的

影响 47

三、超塑性 48

第三章 材料的力学性能 52

第一节 材料承受静载荷时的力学

性能 52

一、材料的拉伸曲线 52

二、材料的变形及其性能指标 53

三、材料的断裂及其性能指标 57

四、材料的弯曲及其性能指标 59

五、材料的硬度 61

第二节 材料承受冲击载荷时的力学

性能	64	二、具有稳定金属间化合物的	
一、缺口试样的冲击试验	64	二元相图	91
二、多次冲击试验	66	第六节 二元合金相图与合金性	
三、冲击韧性及其意义	66	能间的关系	92
第三节 材料的疲劳	67	一、合金的使用性能与相图的	
一、疲劳曲线	67	关系	92
二、疲劳极限	68	二、合金的工艺性能与相图的	
三、疲劳断口	68	关系	93
第四节 材料的断裂韧性	70	第五章 铁碳合金	96
一、断裂韧性的概念	70	第一节 铁碳合金基本组元、组织	
二、影响材料断裂韧性的因素	71	及其性能	96
第五节 材料的磨损性能	72	一、铁碳合金基本组元	96
一、磨损过程和磨损的分类	72	二、铁碳合金中的基本组织及	
二、提高材料耐磨性的途径	73	其性能	97
第六节 材料的蠕变性能	74	第二节 Fe-Fe ₃ C 相图分析	98
一、材料的蠕变现象	74	一、相图中的点、线、区	98
二、蠕变性能指标	74	二、典型合金的平衡结晶过程	
第四章 二元合金相图	77	及室温平衡组织	101
第一节 二元合金相图的建立	77	三、杠杆定律的应用	108
一、二元合金相图的表示方法	77	四、铁碳合金的碳含量与平衡组	
二、二元合金相图的建立方法	78	织、力学性能之间的关系	109
三、杠杆定律	79	五、Fe-Fe ₃ C 相图的应用	111
第二节 二元匀晶相图	80	第三节 碳钢及合金钢概述	112
一、二元匀晶相图的分析	80	一、钢中常存杂质元素的影响	113
二、合金的平衡结晶过程	80	二、钢的分类、编号及应用	114
三、晶内偏析(枝晶偏析)	82	第六章 钢的热处理	123
第三节 二元共晶相图	82	第一节 钢在加热时的转变	124
一、二元共晶相图的分析	83	一、共析钢加热时奥氏体的形	
二、典型合金的平衡结晶过程		成	124
及室温平衡组织	83	二、亚、过共析钢的奥氏体化	
三、相组成物与组织组成物	86	过程	125
第四节 二元包晶相图	88	三、影响奥氏体化的因素	125
一、二元包晶相图的分析	88	四、奥氏体的晶粒度及其长大	127
二、典型合金的平衡结晶过程	89	第二节 奥氏体在冷却时的转变	129
三、包晶偏析	91	一、奥氏体在不同冷却方式下	
第五节 其它常用的二元合金相		的转变	129
图类型	91	二、过冷奥氏体等温转变图(等	
一、二元共析相图	91	温转变 C 曲线)	129

三、过冷奥氏体转变产物的组织形态及其性能	131	六、滚动轴承钢	184
四、影响等温转变图(C曲线)位置 and 形状的因素	136	第二节 合金工具钢	186
五、等温转变图(C曲线)的意义和应用	138	一、刃具钢	186
六、过冷奥氏体连续冷却转变图简介	140	二、模具钢	197
第三节 钢的退火与正火	141	三、量具钢	203
一、退火	141	第三节 特殊性能钢及合金	205
二、正火	142	一、不锈钢	205
三、退火、正火的选用原则	142	二、耐热钢	207
第四节 钢的淬火与回火	143	三、耐磨钢	212
一、钢的淬火	143	四、硬质合金	212
二、淬火钢的回火	146	第八章 铸铁	216
第五节 钢的淬透性	151	第一节 概述	216
一、钢的淬透性与淬硬性	151	一、铸铁的特点	216
二、淬透性对钢的力学性能的影响	151	二、Fe-C 双重相图及铸铁中石墨的形成	217
三、影响淬透性的因素	152	三、铸铁的分类	218
四、淬透性的测定及表示方法	152	第二节 灰铸铁	219
五、淬透性的应用	154	一、灰铸铁的组织、性能和用途	219
第六节 钢的表面淬火	154	二、灰铸铁的孕育处理	222
一、表面淬火的定义及方法	154	三、灰铸铁的热处理	222
二、感应加热表面淬火	154	第三节 可锻铸铁	223
三、火焰加热表面淬火	157	一、可锻铸铁的组织、性能和用途	223
第七节 钢的化学热处理	158	二、可锻铸铁的生产	224
一、化学热处理的定义	158	第四节 球墨铸铁	225
二、钢的渗碳	158	一、球墨铸铁的生产	225
三、钢的渗氮	163	二、球墨铸铁的牌号、组织和性能	225
四、钢的碳氮共渗	164	三、球墨铸铁的热处理	227
第七章 合金钢	169	第五节 其它铸铁简介	228
第一节 合金结构钢	169	一、耐磨铸铁	228
一、低合金结构钢	169	二、耐热铸铁	228
二、易切削钢	171	三、耐蚀铸铁	230
三、渗碳钢	172	第九章 非铁(有色)金属及其合金	231
四、调质钢	175	第一节 铝及其合金	231
五、弹簧钢	181	一、概述	231

二、铝合金的强化	232	四、按变形规律调整加工尺寸	269
三、铸造铝合金及其热处理	235	五、预留加工余量	270
四、变形铝合金及其热处理	237	六、更换材料	272
第二节 铜及其合金	240	七、提高表面质量	273
一、概述	240	第四节 热处理与切削加工性的	
二、黄铜	243	关系	273
三、青铜	244	第五节 典型零件选材及工艺分	
第三节 钛及其合金	247	析	275
一、钛及其合金的性能特点	247	一、齿轮类	275
二、钛合金的分类	247	二、轴类	278
三、常用钛合金	247	第十一章 高分子材料	287
第四节 轴承合金	249	第一节 高分子材料概述	287
一、概述	249	一、高分子化合物与高分子材	
二、锡基轴承合金	250	料	287
三、铝基轴承合金	250	二、高分子化合物的组成	288
四、铜基轴承合金	251	三、高分子化合物的聚合类型	290
第五节 新型及特种用途材料	252	四、高分子化合物的分类和命	
一、非晶态合金	252	名	291
二、纳米材料	253	五、高分子化合物的结构	292
三、纳米碳管	254	六、高分子材料的性能	298
四、梯度材料	256	七、高分子材料的老化与防止	302
五、记忆合金	256	第二节 工程塑料	302
六、储氢材料	257	一、工程塑料概述	302
第十章 机械零件选材及工艺		二、热塑性工程塑料及应用	305
路线分析	260	三、热固性工程塑料及应用	310
第一节 选材的一般原则	260	四、工程塑料的选材原则和方	
一、材料的力学性能	260	法	313
二、材料的工艺性能	261	第三节 橡胶材料	313
三、材料的经济性	262	一、橡胶材料概述	313
第二节 热处理技术条件的标注	262	二、常用橡胶材料及应用	315
一、整体热处理时的标注图例	263	第十二章 工程陶瓷材料	320
二、局部热处理时的标注图例	263	第一节 陶瓷材料概述	320
第三节 冷加工方面减小变形、		一、陶瓷的定义和分类	320
防止开裂的措施	264	二、陶瓷制品生产工艺	321
一、改进淬火零件结构形状的		三、陶瓷的结构	321
设计	264	四、陶瓷的性能	323
二、合理安排工艺路线	268	第二节 常用工程陶瓷	325
三、修改技术条件	269	一、普通瓷	325

二、氧化铝陶瓷	326	成型工艺	339
三、氮化硅陶瓷	327	第三节 其它复合材料简介	340
四、Sialon 陶瓷	328	一、层合复合材料	340
五、碳化硅陶瓷	329	二、夹层结构复合材料	341
六、氮化硼陶瓷	329	三、颗粒增强复合材料	341
七、碳化硼陶瓷	330	四、纳米复合材料	342
第十三章 复合材料	332	附录	344
第一节 复合材料概述	332	附录 A 常用的力学性能指标及其	
一、复合材料的概念	332	含义	344
二、复合材料的特性	332	附录 B 常用硬度试验方法的原理	
三、复合材料的分类和命名	334	及硬度符号说明	345
四、复合材料的界面与强度	334	附录 C 钢铁金属硬度及强度换算	
第二节 纤维增强聚合物基复合		表 (适用于碳钢及合金	
材料	335	钢)	348
一、玻璃纤维/聚合物复合材		附录 D 钢铁金属硬度及强度换算	
料	335	表 (适用于碳钢)	353
二、碳纤维/聚合物复合材料	337	附录 E 国内外常用钢牌号对照	
三、硼纤维/聚合物复合材料	339	表	355
四、纤维增强聚合物复合材料		参考文献	358

绪 论

人类社会的发展在很大程度上取决于生产力的发展，生产力水平的高低往往以劳动工具为代表，而劳动工具的进步又离不开材料的发展。人类使用材料的历史已有几万年之久。从远古的石器时代到公元前的青铜器时代和铁器时代，金属的使用标志着人类社会开始逐渐进入文明社会。到 18 世纪，随着钢铁材料的广泛应用，极大地促进了世界范围内的工业革命，因而产生了若干经济发达的强国。所以材料对社会文明的进步发挥着重大的作用。

在近代科学技术的推动下，材料科学发展迅速，材料的种类日益增多，不同效能的新材料不断涌现，原有材料的性能不断改善与提高，以满足各种使用要求，故材料科学是科学技术的发展基础、工业生产的支柱。

工程材料是指各种工程上使用的材料。工程材料按其属性可分为两大类，即金属材料和非金属材料。金属材料一般又分为钢铁（黑色金属）材料和非铁金属（有色金属）及其合金材料两类；非金属材料通常又分为无机非金属材料 and 有机高分子材料两类。随着材料科学的发展，单一金属或非金属材料无法实现的性能又可通过复合材料得以实现。

从应用的角度，人们习惯将材料分为两大类，一类是以力学性能为主要使用性能并兼具一定物理、化学性能的“结构材料”；另一类叫做“功能材料”，主要是指具有特异物理化学性质的材料，如超导材料、激光材料、储氢材料、生物材料、阻尼材料、半导体材料、形状记忆材料等。机械工程领域使用的主要是结构材料。

在机械工程领域，如机床、农业机械、交通设备、电工设备、化工和纺织机械等，所使用的钢铁材料占 90% 左右，非铁（有色）金属约占 5%。近些年来，随着许多新型非金属材料的不断开发和应用，金属材料的统治地位已受到挑战，开始出现了金属材料、陶瓷材料和有机高分子材料“三足鼎立”的新局面。

目前，陶瓷材料已远远超出其作为建筑材料（以粘土、石英、长石等为主要成分）使用的范围。近 20 年中，以研究工程陶瓷（以 Al_2O_3 、 SiC 、 Si_3N_4 等为主要成分）用于工程结构件如陶瓷轴承、陶瓷发动机等为目标，在世界范围内兴起了陶瓷热。现在，陶瓷功能材料、陶瓷轴承已投入工业应用，陶瓷材料正显现出良好的发展前景。

高分子材料（包括工程塑料、橡胶、合成纤维等）也正以前所未有的速度

发展。随着各种合成或制备技术不断出现和完善，高分子材料的产量和性能均不断提高。有关专家预测，汽车的车身不久将大部分采用工程塑料，每 kg 工程塑料可代替 4 ~ 5kg 钢铁，而且可整体成型，因而成本和油耗将进一步降低。由于高分子材料由人工合成，且原料充足，可以设计、制造出无穷的新产品，应用前景十分广阔。

陶瓷材料和高分子材料的发展速度虽然很快，但它们还不可能全面地取代传统的金属材料，金属材料目前在工业中，特别是在机械工业中，仍然占有主导地位。

我国是金属材料生产和使用的大国。以钢铁为例，1996 年我国钢产量为 10124 万吨，2000 年已达 13000 万吨，但是我国的特殊钢生产仍然供不应求，每年要花大量的外汇进口合金钢材。特别是我国明确提出要加速发展汽车工业，到 2010 年汽车工业将与钢铁、石油、化工和建筑业一样形成国民经济的支柱产业，其年产量将由目前的 200 万辆达到 600 多万辆。仅就汽车工业的发展而言，对钢材的需求量（约占全国钢材年产量 20% 左右）也会不断上升。

钢铁材料因其具有优良的力学性能、工艺性能和低的成本，使其在 21 世纪中仍将占有重要地位，高分子材料、陶瓷材料及复合材料等虽会少量地代替金属材料，但钢铁材料的应用不可能大幅度衰减。

本课程是机械类、近机械类冷加工各专业的一门必修的技术基础课。

本课程的任务是从机械工程材料的应用角度出发介绍机械工程材料的基本理论，介绍材料的化学成分、加工工艺、组织结构与性能之间的关系，介绍常用机械工程材料及应用等基本知识。

本课程的目的是使学生通过学习，在掌握机械工程材料的基本理论及基本知识的基础上，具备根据机械零件的使用条件和性能要求，对机械零件进行合理地选材及制订零件加工工艺路线的初步能力。

本课程的内容分为金属材料和非金属材料两大部分。金属材料部分由金属学、热处理、金属材料等三方面内容组成，非金属材料部分包括高分子材料、陶瓷材料和复合材料等。

本课程基本要求如下：

(1) 金属学方面 了解金属和合金的晶体结构、结晶过程、塑性变形与再结晶以及二元相图的基本知识，为掌握工程材料内部组织结构及其变化规律、理解不同金属材料之间的性能差异打下基础，也为学习热处理和金属材料作好知识准备。

(2) 热处理方面 了解钢铁材料热处理的基本原理和工艺，以及热处理工艺在机械零件加工过程中的作用，以便能根据零件的技术要求正确选定热处理工艺方法，合理安排工艺路线。

(3) 金属材料方面 掌握常用的碳钢、合金钢、铸铁、非铁（有色）金属及合金（铜合金、铝合金、轴承合金、钛合金）的成分、组织、性能和用途的基本知识，以便能合理地选用金属材料。了解新型功能材料的发展状况。

(4) 非金属材料方面 了解高分子材料、陶瓷材料、复合材料的基本组成、性能及应用等方面的基础知识。

学习本课程前，学生应先学完材料力学，参加过金工实习，以便对机械工程材料的工艺过程及应用具有一定的感性知识。

第一章 材料的结构和金属的结晶

材料的性能主要取决于其化学组成和结构。所谓结构是指材料中原子的排列位置和空间分布，包括了三个层次：原子结构和原子结合键、原子的空间排列即晶体结构、相和组织。晶体缺陷赋予了材料组织和性能的多样性，是分析材料性能的金钥匙。通过本章学习掌握材料的成分-组织-性能之间的内在联系，从而为零件的选材和热处理工艺设计打下基础。

第一节 晶体结构和非晶体

一、原子的结合键及其特性

当两个或多个原子形成分子或固体时，它们是依靠什么样的结合力聚集在一起的，这就是原子间的键合问题。原子通过结合键可构成分子，原子之间或分子之间也靠结合键聚结成固体状态。

结合键可分为化学键和物理键两大类。化学键即主价键，它包括金属键、离子键和共价键；物理键即次价键，也称范德华力。此外，还有一种结合键称为氢键，其性质介于化学键和范德华力之间。

（一）金属键

金属原子的结构特点是外层电子少，容易失去。当金属原子相互靠近时，其外层的价电子脱离原子成为自由电子，为整个金属所共有，它们在整个金属内部运动，形成电子气。这种由金属正离子和自由电子之间互相作用而结合称为金属键。

金属键无方向性和饱和性，故金属的晶体结构大多具有高对称性，利用金属键可解释金属所具有的各种特性。金属内原子面之间相对位移，金属键仍旧保持，故金属具有良好的延展性。在一定电位差下，自由电子可在金属中定向运动，形成电流，显示出良好的导电性。随温度升高，正离子（或原子）本身振幅增大，阻碍电子通过，使电阻升高，因此金属具有正的电阻温度系数。固态金属中，不仅正离子的振动可传递热能，而且电子的运动也能传递热能，故比非金属具有更好的导热性。金属中的自由电子可吸收可见光的能量，被激发、跃迁到较高能级，因此金属不透明。当它跳回到原来能级时，将所吸收的能量重新辐射出来，使金属具有金属光泽。

（二）离子键

大部分盐类、碱类和金属氧化物在固态下是不能导电的，熔融时可以导电。这类化合物为离子化合物。当两种电负性相差大的原子（如碱金属元素与卤族元素的原子）相互靠近时，其中电负性小的原子失去电子，成为正离子，电负性大的原子获得电子成为负离子，两种离子靠静电引力结合在一起形成离子键。

由于离子的电荷分布是球形对称的，因此它在各方向上都可以和相反电荷的离子相吸引，即离子键没有方向性。离子键的另一个特性是无饱和性，即一个离子可以同时和几个异号离子相结合。例如，在 NaCl 晶体中，每个 Cl^- 离子周围都有 6 个 Na^+ 离子，每个 Na^+ 离子周围也有 6 个 Cl^- 离子等距离排列着。离子晶体在空间三个方向上不断延续就形成了巨大的离子晶体。离子型晶体 NaCl 的晶体结构如图 1-1 所示。

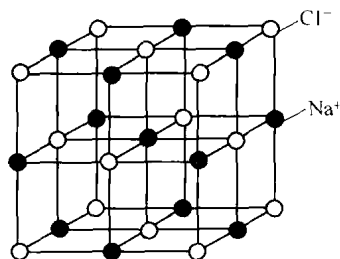


图 1-1 NaCl 晶体结构

离子型晶体中，正、负离子间有很强的电的吸引力，所以有较高熔点，离子晶体如果发生相对移动，将失去电平衡，使离子键遭到破坏，故离子键材料是脆性的。离子的运动不像电子那么容易，故固态时导电性很差。但当处在高温熔融状态时，正负离子在外电场作用下可以自由运动，即呈现离子导电性。

（三）共价键

有些同类原子，例如周期表 IVA, VA, VIA 族中大多数元素或电负性相差不大的原子互相接近时，原子之间不产生电子的转移，此时借共用电子对所产生的力结合，形成共价键。金刚石、单质硅、SiC 等属于共价键。实践证明，一个硅原子与 4 个在其周围的硅原子共享其外壳层能级的电子，使外层能级壳层获得 8 个电子，每个硅原子通过 4 个共价键与 4 个邻近原子结合，如图 1-2 所示。共价键具有方向性，对硅来说，所形成的四面体结构中，每个共价键之间的夹角约为 109° 。在外力作用下，原子发生相对位移时，键将遭到破坏，故共价键材料是脆性的。为使电子运动产生电流，必须破坏共价键，需加高温、高压，因此共价键材料具有很好的绝缘性。金刚石中碳原子间的共价键非常牢固，其熔点高达 3750° ，是自然界中最坚硬的固体。

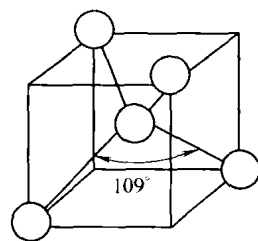


图 1-2 Si 形成的四面体

（四）分子键

分子型物质能由气态转变为液态，由液态转变为固态，这说明分子间存在着相互作用力，这种作用力称为分子间力或范德华力。范德华力是存在于分子间的一种吸引力，它比化学键弱得多。一般来说，某物质的范德华力越大，则它的熔点、沸点就越高。对于组成和结构相似的物质，范德华力一般随着相对

分子质量的增大而增强。

（五）氢键

氢键是一种特殊的分子间作用力。它是由氢原子同时与两个电负性很大而原子半径较小的原子（O，F，N 等）相结合而产生的具有比一般次价键大的键力，又称氢桥。氢键具有饱和性和方向性。

氢键可以存在于分子内或分子间。氢键在高分子材料中特别重要，纤维素、尼龙和蛋白质等分子有很强的氢键，并显示出非常特殊的结晶结构和性能。

二、晶体和非晶体概念

固体物质按原子（离子或分子）的聚集状态分为两大类，即晶体和非晶体。它们的本质区别是：晶体内部的原子（离子或分子）是规则排列的，而非晶体内部的原子（离子或分子）是无规则排列的（不排除局部的短程规则排列）。晶体材料如钢铁、有色金属、金刚石、硅酸盐等；非晶体材料如玻璃、橡胶、塑料等。

晶体具有固定的熔点，而非晶体没有；晶体在不同的方向上表现出不同的物理、化学和力学性能，即具有各向异性的特征，而非晶体则是各向同性的。

三、非晶体结构

（一）非晶态金属

金属及合金极易结晶，传统的金属材料都以晶态形式出现。但如将某些金属熔体，以极快的速率急剧冷却，例如每秒钟冷却温度大于 100 万℃，则可得到一种崭新的材料。由于冷却极快，高温下液态时原子的无序状态，被迅速“冻结”而形成无定形的固体，这称为非晶态金属；因其内部结构与玻璃相似，故又称金属玻璃。

（二）非晶态高分子

高分子是长链结构，这个长链是曲曲折折的蜷曲形。有规则的蜷曲（折叠）形成晶态，无规则的蜷曲形成非晶态；高分子的分子与分子堆砌在一起。有规则的堆砌形成规整的晶态排列；无规则的堆砌形成非晶态。规整结构中分子排列紧密，试剂不易侵入，官能团不易起反应；不规整结构中分子排列疏松，试剂容易侵入，官能团容易起反应。同一种高分子化合物可以兼具晶态和非晶态两种结构。大多数的合成树脂都是非晶态结构。聚合物的聚集态结构如图 1-3 所示。

（三）非晶态陶瓷（玻璃相）

玻璃材料为经熔融、冷却、固化，具有无规则结构的非晶态无机物，原子排列近似液体，近程有序，形状又像固体那样保持一定的形状。玻璃的结构特征表现在近程有序和长程无序。其宏观表现为无序均匀和连续，微观又是有序、不均匀和不连续。

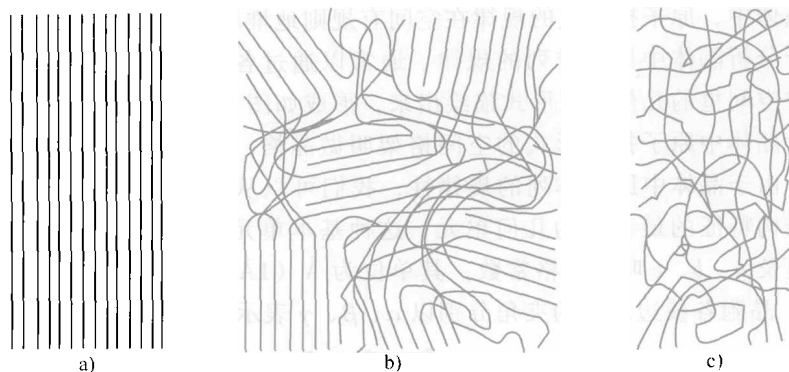


图 1-3 聚合物的聚集态结构

a) 晶态 b) 部分晶态 c) 非晶态

玻璃相多为无规则网络的硅酸盐结构，但其排列是无序的，因此整个玻璃相是一个不存在对称性及周期性的体系。图 1-4 是石英 (SiO_2) 晶体与石英玻璃 (SiO_2) 结构对比示意图。

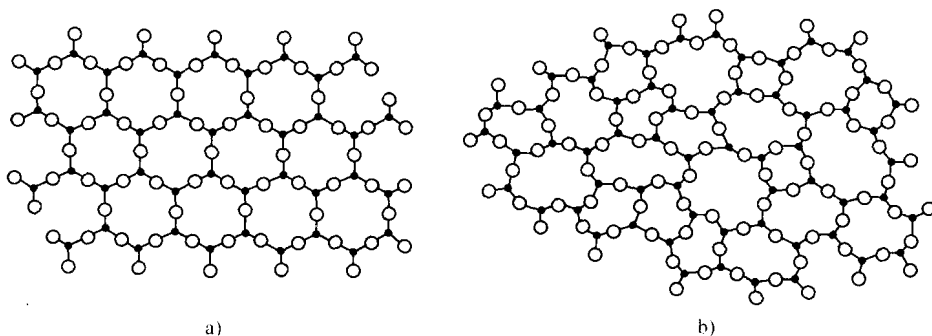


图 1-4 石英结构示意图

a) 石英晶体 b) 石英玻璃

四、晶体结构的基本概念

固态物质按原子（离子或分子）的聚集状态分为两大类，即晶体和非晶体（又叫玻璃态或无定形结构）。晶体材料如钢铁、非铁（有色）金属、金刚石、硅酸盐等；非晶体材料如玻璃、橡胶、塑料等。晶体与非晶体的本质区别是：晶体内部的原子（离子或分子）是规则排列的；而非晶体内部的原子（离子或分子）是无规则排列的（不排除局部的短程规则排列）。

由于晶体与非晶体内部原子排列规律不同，其性能也不相同。晶体具有固定的熔点而非晶体没有，非晶液体态与固态之间的转变是一个逐渐过渡的过程。此外，晶体在不同方向上常表现出不同的物理、化学或力学性能，即具有各向异性的特征，而非晶体则是各向同性的。