

高等学校教材

工 程 材 料

(工程材料及机械制造基础 I)

詹 武 主编

机械工业出版社



本书是根据国家教委 [1995] 82 号文颁发的“工程材料及机械制造基础课程教学基本要求”编写的。本书概述了工程材料的基本理论及必要的工艺知识,阐明了材料的结构、性能、环境三者之间的关系以及如何根据实际需要合理选择工程材料及材料的处理工艺等。全书共分八篇(二十六章),包括工程材料基础;钢的热处理;材料的表面处理;钢铁材料;有色金属材料;非金属材料;材料及热处理的选用;实验。与一般教材相比,本书增加了表面处理、失效分析等章节,充实了新材料、新工艺、新技术的内容;增加了实验部分及复习思考题。

本书可作为高等院校机械类、近机类及其它有关专业本科或专科学生的教材,也可供技术师范院校、职工大学、电视大学、业余大学、函授大学选用,还可供从事设计、制造、科研工作的有关科技人员参考。

工 程 材 料

(工程材料及机械制造基础 I)

詹 武 主编

*

责任编辑:杨 燕 版式设计:王 颖

封面设计:郭景云 责任校对:熊天荣

责任印制:卢子祥

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张 22.5·字数 552 千字

1997 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

印数 0 001—6 000 定价:26.00 元

*

ISBN 7-111-05620-5/TG·1151 (课)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

ISBN 7-111-05620-5



9 787111 056201 >



前 言

“工程材料及机械制造基础”和“金工实习”是高等工业学校机械类各专业必修的技术基础课,是研究零件制造工艺方法的综合技术性学科。它主要研究工程材料的性能及其对加工工艺方法的影响,各种工艺方法本身的规律性及其相互联系与比较,各种加工方法的加工工艺过程和结构工艺性。

根据国家教委高等教育司 1995 年颁布的高等工科院校“工程材料及机械制造基础课程教学基本要求”和“金工实习教学基本要求”,我们组织了有关高校长期工作在本学科教学第一线、有丰富教学经验的教师成立了教材编写组,分工编写了《工程材料》、《热加工工艺基础》、《机械加工工艺基础》和《金工实习》一套系列教学用书。

《工程材料》与以往同类教材相比,具有以下特点:

(1) 精练了传统内容并保留其精华,同时进行了内容的更新、章节比例的调整,例如增加了表面处理及失效分析的内容,提高了非金属材料的比重,突出了塑料部分,加强了材料结构方面的基础理论等。

(2) 增加了新材料、新技术、新工艺方面的内容,反映了工程材料的发展趋势。

(3) 编入了实验部分和复习思考题并加强了材料及热处理选用方面的内容,注重对学生能力的培养。

(4) 全面贯彻了与本书内容有关的最新国家标准和部颁标准。

(5) 本书的适用性强,选择余地大,可根据不同专业的需要及规定的学时要求,选择适当内容进行讲授。

参加本书编写的有:詹武(前言、绪论、第一、三章、附录)、任福东(第六、十九、二十、二十一章)、吕东升(第十二、十三、十四、十七、十八章)、赵燕平(第十五、二十二、二十六章)、董金铎(第七、八、二十五章、实验五)、丁晨旭(第十六、二十三章、实验三、四)、郑连义(第二、十、十一章)、黄丽明(第五、二十四章)、杨惠珍(第九章、实验七、八)、张惠云(第四章、实验一、二、六)。全书由詹武主编,任福东副主编,韩立民主审(其中第一稿、第二稿主要由詹武审改、第三稿由韩立民审改)。

本书在编写中参考了现已出版各类《工程材料》、《机械工程材料》、《金属材料及热处理》等教材,并注意采纳各院校及工厂、科研单位的改革经验及论文资料,为此谨致衷心的感谢。由于我们水平有限,加之又作了较大的改革尝试,书中必然有不足之处,恳请读者批评指正。

编者

1996 年 9 月

目 录

前言

绪论 1

第一篇 工程材料基础

第一章 材料结构概述 4

第一节 材料结构的内容 4

第二节 材料的结构—性能—环境之间
的关系 5

第三节 材料结构的特性 6

第四节 材料结构的结合键 7

第五节 材料结构的类型 9

复习思考题 13

第二章 材料的性能 14

第一节 材料的使用性能 14

第二节 材料的工艺性能 21

复习思考题 21

第三章 纯金属的结构与结晶 22

第一节 金属键与金属的特性 22

第二节 纯金属常见的晶体结构 23

第三节 实际金属中的晶体缺陷 25

第四节 金属的结晶 27

第五节 同素异构转变 32

复习思考题 32

第四章 合金的结构及铁碳相图 34

第一节 合金的结构 34

第二节 二元合金相图 37

第三节 铁碳合金的结构及其相图 47

复习思考题 60

第五章 金属的塑性变形与再结晶 62

第一节 金属的变形与断裂 62

第二节 金属的塑性变形对组织和性能
的影响 67

第三节 变形金属在加热时组织和性能
的变化 69

第四节 金属的热变形加工 73

复习思考题 75

第二篇 钢的热处理

第六章 钢的热处理原理 76

第一节 钢在加热时的转变 77

第二节 钢在冷却时的转变 79

复习思考题 90

第七章 钢的普通热处理 91

第一节 钢的退火和正火 91

第二节 钢的淬火 93

第三节 钢的淬透性 97

第四节 钢的回火 104

复习思考题 110

第八章 钢的表面热处理 111

第一节 钢的表面淬火 111

第二节 钢的化学热处理 115

复习思考题 121

第九章 热处理技术新发展 122

第一节 可控气氛热处理 122

第二节 真空热处理 123

第三节 离子轰击热处理 124

第四节 复合热处理 125

第五节 形变热处理 126

复习思考题 127

第三篇 材料的表面处理

第十章 常用的表面处理工艺 128

第一节 氧化处理 128

第二节 磷化处理	130
第三节 电镀	131
第四节 刷镀	132
第五节 热喷涂	134
第六节 涂装	136
复习思考题	137

第十一章 表面处理新工艺	138
第一节 铝氧化膜的着色技术	138
第二节 分散电镀	139
第三节 表面处理仿金工艺	140
复习思考题	141

第四篇 钢铁材料

第十二章 工业用钢概述	142
第一节 钢中的常存元素及有害元素	142
第二节 钢的分类	143
第三节 钢的合金化	144
第四节 碳素钢与合金钢的比较	151
复习思考题	152
第十三章 结构钢	153
第一节 碳素结构钢	153
第二节 优质碳素结构钢	153
第三节 低合金结构钢	156
第四节 合金结构钢	158
第五节 渗碳钢	158
第六节 调质钢	161
第七节 弹簧钢	164
第八节 滚动轴承钢	167
复习思考题	170
第十四章 工具钢	171
第一节 碳素工具钢	171
第二节 低合金工具钢	173

第三节 高速钢	175
第四节 模具钢	181
第五节 量具钢	185
第六节 硬质合金	187
复习思考题	189
第十五章 特殊性能钢	190
第一节 不锈钢	190
第二节 耐热钢及耐热合金	195
第三节 耐磨钢	198
复习思考题	199
第十六章 铸铁	200
第一节 铸铁概述	200
第二节 灰铸铁及孕育铸铁	202
第三节 可锻铸铁	206
第四节 球墨铸铁	208
第五节 蠕墨铸铁	211
第六节 特殊性能铸铁	211
复习思考题	212

第五篇 有色金属材料

第十七章 铝、钛及其合金	214
第一节 铝及其合金	214
第二节 钛及钛合金	224
复习思考题	228

第十八章 铜及轴承合金	229
第一节 铜及其合金	229
第二节 轴承合金	242
复习思考题	246

第六篇 非金属材料

第十九章 高分子材料的基础知识	247
第一节 高分子材料的基本概念	247
第二节 高分子材料的柔顺性	250
第三节 高分子材料的聚集态	251
第四节 高分子材料的力学状态	251
第五节 高分子材料的其它性能及改性	252
复习思考题	253

第二十章 塑料和橡胶	254
第一节 塑料概述	254
第二节 常用塑料	256
第三节 橡胶	259
复习思考题	261
第二十一章 陶瓷材料和复合材料	262
第一节 陶瓷	262

第二节 复合材料	264	第四节 低温材料	271
复习思考题	267	第五节 形状记忆材料	271
第二十二章 新型工程材料	268	第六节 贮氢材料	272
第一节 光导纤维和微晶玻璃	268	第七节 磁性材料	273
第二节 超导材料	269	复习思考题	275
第三节 减振材料	270		

第七篇 材料及热处理的选用

第二十三章 材料选用原则与步骤	276	第一节 热处理工艺设计步骤	291
第一节 选材与使用性能的关系	276	第二节 热处理工序安排	293
第二节 选材与工艺性能的关系	277	第三节 常见的热处理缺陷及零件的热 处理结构工艺性	294
第三节 选材对经济性的考虑	279	第四节 热处理技术条件的标注	299
第四节 选材的步骤	280	复习思考题	303
复习思考题	280	第二十六章 典型零件材料及热处理 选择实例	304
第二十四章 零件的失效分析	281	第一节 轴类零件	304
第一节 概述	281	第二节 齿轮类零件	307
第二节 零件失效的原因	281	第三节 其它零件	309
第三节 失效分析的方法	282	复习思考题	313
第四节 零件失效分析与选材的关系	285		
复习思考题	290		
第二十五章 热处理工艺设计	291		

第八篇 实 验

实验一 金相显微镜的使用和金相试样 的制备	314	组织观察	331
实验二 铁碳合金的平衡组织观察	317	实验七 钢铁材料的火花鉴别	339
实验三 硬度测量	322	实验八 钢的淬透性与回火稳定性	345
实验四 钢的热处理	326	附录	350
实验五 碳钢在不同热处理状态下的显微 组织	329	附录 A 国内外部分钢号对照	350
实验六 铸铁、合金钢及有色金属的显微 组织		附录 B 常用塑料、复合材料缩写代号	352
		参考文献	354

绪 论

一、材料与材料科学概述

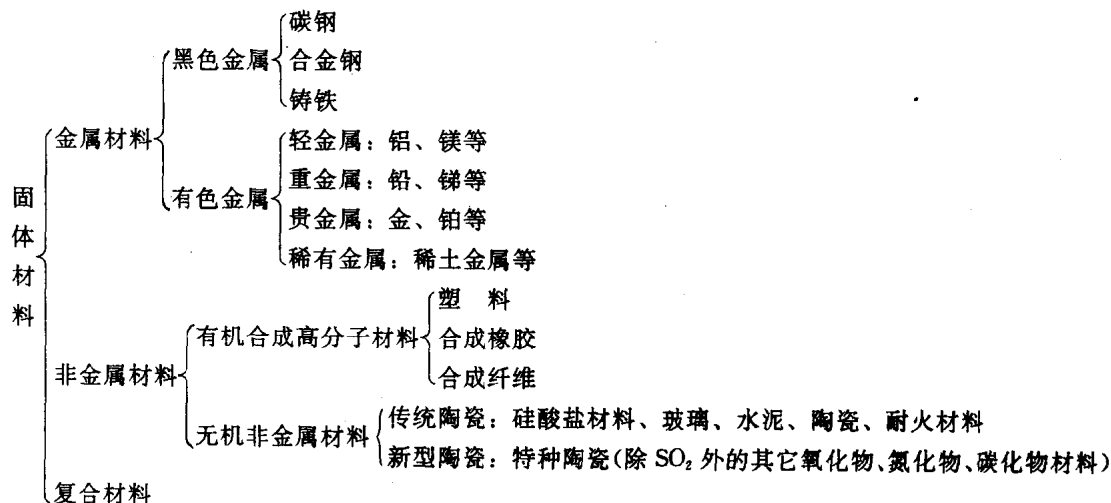
材料是用来制造日常生活、生产、科研、国防需要品的物质。广义的材料包括人们思想意识之外的所有物质。一般所指的材料主要是工业和尖端技术中着重应用的金属和合金、陶瓷、聚合物和复合材料，也包括精密合金、半导体和超导体等。

材料科学是以材料为研究对象，探讨材料的性能、结构与制造工艺环境及使用环境三者相互关系和规律的科学。材料科学主要研究材料的分子或原子结构、微观组织以及加工制造工艺和性能之间的关系。它以化学、固体物理、力学等为基础，是一门多种学科交织在一起的边缘科学。随着工业生产中材料的不断发展，产生了金属、陶瓷、高分子等独立的材料分支学科。在近代工业生产及科学领域中，不同的材料在使用中不但互相配合、互相替用，并且发现不同材料分支学科中存在的一些规律可以互相借鉴、具有共性。在此基础上，60年代初正式提出了“材料科学”的概念，它是研究材料共同规律的学科。工程材料学就是其中的一门材料学科，它是材料学科的实用部分，重点阐述结构材料的性能、结构、工艺、应用间关系的一般规律和知识。

材料的分类方法很多，主要可按用途、状态、化学性质、物理性质、物理效应分类，下面就主要分类方法加以说明。

(一) 按化学性质分类

可分为金属材料、非金属材料 and 复合材料。



(二) 按用途分类

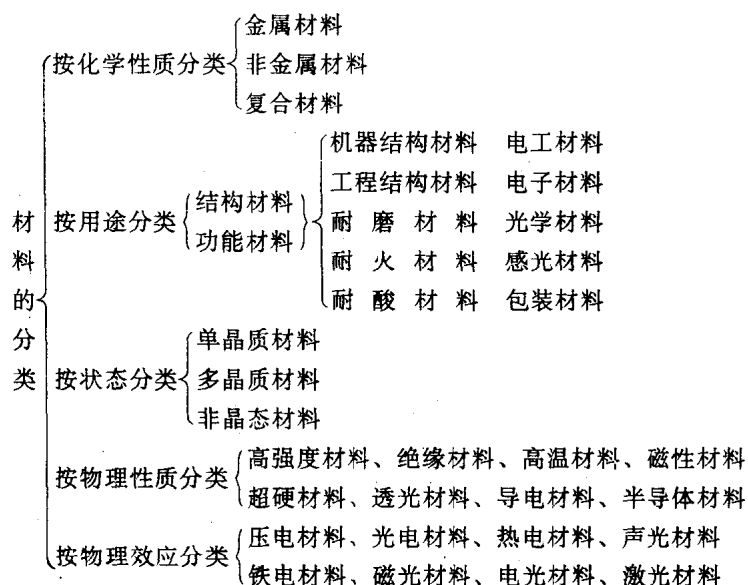
可分为结构材料 and 功能材料。

1. 结构材料 是指工程上要求强度、韧性、塑性等力学性能的材料，例如机器结构材料、工程结构材料等。

2. 功能材料 是指主要利用它们的电、光、声、磁、热等效应和功能的材料。例如电工

材料、电子材料、光学材料、声光材料等。

工程材料是指结构材料中应用于工程构件、机械零件、工具等的材料。本课程主要以研究工程材料为主，其中着重于机械工程材料。现将材料的具体分类综合于下：



二、材料与材料科学的作用与地位

材料是工业、农业、国防、科学技术以及人民生活赖以存在和发展的物质基础。人类的衣、食、住、行都离不开使用材料；机械制造、交通运输、国防及科研也大量使用钢铁、有色金属、粉末冶金材料及各种非金属材料；固体电子器件缺少不了锗、硅等半导体材料；光电子技术器件就需要调制、倍频、存储、显示等功能材料；宇航工程就必须有各种高性能的尖端材料来制造火箭、导弹、宇宙飞船等。

材料的制造与使用水平是人类文明进步的划分标志。从历史来看，社会的文明进步和生产技术的发展，总是和新材料的出现密切相关，它们既互为因果，又互相促进。人类社会的发展历史证明，生产中使用的材料的性质直接反映人类社会的文化水平。根据制造和使用材料的水平，可将人类的发展史划分为石器时代、青铜器时代、铁器时代。而今是使用金属的鼎盛时期，可以预料今后人类必将跨进人工合成材料的新时代。以上种种说明了材料对于人类社会的重要作用，在某种意义上也可以说，人类文明发展史是人类对材料占有、认识、制造、使用和发展的历史。

材料科学是现代技术的三大支柱之一。现代综合性的新技术发展的一个重要特点是：需要品种规格多、性能特殊的新材料，因此现代新兴科学技术的发展，大大促进了新技术的进步。反过来，一种新材料的出现，往往可以导致一系列新技术的突破。例如要提高热机效率势必会升高工作温度，所以要求制造热机的结构材料在高温具有足够的强韧性、抗热性。这是一般钢铁材料无法达到的。而用新型工程陶瓷材料制成的高温结构陶瓷柴油机，可节油30%，热机效率提高了50%。目前甚至还研制出在1400℃工作的涡轮发动机陶瓷叶片，大大提高了效率。这说明开发新材料可提高现有能源的利用率。

半导体材料、传感器材料、光导纤维材料的开发也促进了信息技术的提高与发展。气体分离膜及其它分离膜材料的研制有可能给化学工业带来重大变革，现已用于气体富集、淡化

海水、处理废水等方面。

未来各种新兴产业的发展，无不依赖于新材料的进步。像开发海洋用深潜器及各种海底设施需要耐压、耐蚀的新型结构材料。卫星、宇航设备需要轻质高强度新材料。医学上制造人工脏器、人造骨骼、人造血管等要用各种具有特殊功能且与人体相容的新材料。

三、工程材料课的目的和基本要求

综上所述不难看出材料及材料科学的重要性。工程材料是材料中的重要部分。“工程材料”课是“工程材料及机械制造基础”课程中的第 I 部分。这是高等学校机械类及近机类专业必修的技术基础课。它的先修课是物理、化学、材料力学、金属工艺学等。学习本课程的目的为了获得有关工程材料的基础理论和必要的工艺知识，培养工艺分析的初步能力，掌握和运用常用工程材料的种类、成分、组织、性能和改性方法。理解和应用材料的性能、结构、工艺、使用之间的关系规律，合理选用工程材料及相应的简明处理工艺。

工程材料课的基本要求主要是了解工程材料的力学性能、纯金属及合金的结构和性能、铁碳相图；熟悉热处理组织转变，掌握普通和表面热处理的特点与应用；掌握常用钢铁材料和其它金属材料的特性及应用；熟悉非金属材料特别是塑料的特性及应用；了解表面处理方法及零件的主要失效形式；熟悉选材原则及合理选用材料及热处理。

第一篇 工程材料基础

第一章 材料结构概述

第一节 材料结构的内容

一、材料结构

材料结构是指组成材料的原子（或离子、分子）相互结合的方式或构成的形式（这些形式称为结构要素）以及结构要素按一定次序的组合、排列及相互间的各种联系。不同材料有各种不同的结构要素，例如后面各章要介绍的各种各样的相、组织、缺陷、单体、大分子链等都属于材料的结构要素。

现以金属材料为例来说明材料结构的含义。金属材料的基本组元是组成材料各元素的原子，它们能相互结合起来，有的呈规则排列、形成晶体；有的呈无规则排列，形成非晶体。在晶体中，如果不同的原子在固态下能相互溶解，就形成了固溶体物质，也可以相互化合产生化合物物质。这些不同的固溶体、化合物就构成了金属材料结构一个个不同的相（相就是材料中化学成分和晶体结构均匀一致的部分，由相界面和其它部分分开）。一个相可作为一种材料的组织，二个或二个以上的相也可组成一种材料的组织。这一个个的组织可在光学金相显微镜或电子显微镜下观察到，它们有不同的形态特征，一般称为材料的显微组织。上面所述的各种固溶体、化合物以及它们组成的各种相、组织就是构成金属材料的结构要素，它们的不同组合、排列、相互联系构成了不同金属材料的微观结构。

二、材料结构的具体内容

材料结构包括以下内容：

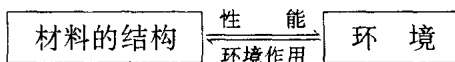
1. 组成材料原子（或离子、分子）的构造 组元原子有它本身的结构特点，例如原子的半径大小、电负性的强弱、电子浓度的高低等等，这些特征直接影响材料结构及其性能。高分子材料由很多大分子链构成，而形成它们的大分子链本身也有它的结构特点。
2. 组成材料原子（或离子、分子）间的结合 它们之间靠着各种键力相互结合起来。结合键可有金属键、离子键、共价键、分子键……。
3. 组成材料原子（或离子、分子）的排列 包括有规则的晶体排列、无规则的非晶体排列或晶体与非晶体的混合排列。
4. 材料结构内存在的缺陷 有规则原子排列的晶体内，并不是完全的理想状态，实际存在各种缺陷，根据缺陷在空间的形貌特征，可分为面缺陷、线缺陷、点缺陷。

第二节 材料的结构—性能—环境之间的关系

一、材料的性能

(一) 材料的性能是材料结构反作用于环境的能力

材料处在一定的温度、压力、介质条件的环境之中，材料结构与环境之间发生相互作用。



材料能否在一定的环境中存在而不被破坏，这要看材料结构对环境的作用有多大的承受能力，也就是反作用于环境的能力，这就是材料所具有的性能（功能），它是材料结构保持其本身稳定性的一种趋向。材料的性能包括使用性能和工艺性能。

(二) 材料的性能是由结构所决定的

(1) 组成材料的结构要素不同，材料结构也不同，则材料的性能也不同，结构要素是形成材料性能的基础。组成材料结构要素相同，但其排列、组合不同，也构成不同的材料结构，从而有不同的性能。不同结构要素的材料，虽然结构不同，但也有可能在单一的性能方面相同或相近，但不可能在所有性能上都一样。

(2) 材料的性能具有多面性。同一材料可以从物理、化学、力学等不同侧面考察它的性能。就力学性能而言还可以从强度、硬度、塑性、韧性……多个方面描绘材料所具有的性能。

(3) 材料的性能是可变的，它受环境的影响，当环境中温度、压力、介质条件发生一定的变化时，材料结构会发生变化，从而使性能也发生相应的变化。

二、材料结构所处的环境

材料结构所处的环境是指材料结构整体存在和发展的全部的外界条件。简单说，材料存在于一定的环境中。材料经历着加工制造和使用二个过程，因此材料所处的环境也可分为两类：一是在加工处理、制造材料过程中的加工工艺环境；二是材料制成产品后在使用过程中的材料使用环境，一般称为工作条件或服役条件。环境因素主要包括温度条件、压力条件和介质条件。

三、材料结构与环境之间的物质和能量交换

(一) 材料结构与环境间有物质的交换

材料在加工制造过程中要经历冶金、铸造、焊接等过程。这当中就要对材料进行精炼去杂，添加元素、调整成分、氧化还原。在化学热处理时，材料会发生渗入活性原子、离子注入、气相沉积扩散等现象。这些典型的例子都说明了材料结构与外界环境间进行了种种物质的交换，是人为有意识造成的物质交换。

材料制成的产品在一定环境中使用，在一定的温度、压力、介质作用下，可能会发生溶解、挥发、电化学与化学腐蚀、摩擦磨损等现象，这中间也发生了材料与环境间的物质交换。

(二) 材料结构与环境间有能量的交换

1. 热能的交换 材料被环境加热和冷却时二者之间产生温差，进行了热能的传递。

2. 机械能的交换 材料受力、变形与外界产生了机械能的交换。

3. 其它能量的交换 材料在环境中承受电场和磁场的作用，吸收或放出各种电磁波，材料与环境产生了电磁能的转换，有时可能承受中子辐射，也进行了能量的交换。

第三节 材料结构的特性

材料结构具有下述特性:

(1) 材料结构与环境之间是相互联系、互相作用的, 这些联系和作用表现在材料结构与环境之间总是存在物质、能量的交换, 这就是开放的材料系统。只有能量交换或忽略物质的交换时叫封闭的材料系统。而完全没有任何交换的叫孤立的材料系统, 它只是理论上存在。

(2) 环境中当温度、压力、介质条件发生一定程度变化时, 材料结构也会发生相应的变化。材料结构的可变性, 表现在材料的结构随着环境因素的变化而变化。当温度、压力、介质等环境因素改变时, 发生了物质、能量的交换而使其结构也会发生相应的变化。例如当环境温度改变时, 与材料有着热能的交换, 使金属材料在低温下以有规则排列的固态存在, 在高温下呈无规则排列的液态, 在更高温度下则以完全无规则排列的气态存在, 结构发生了变化。又例如, 当环境对金属材料施加(压)力时, 机械能的转换使材料发生了弹性变形、塑性变形、裂纹、甚至断裂。受力不同发生变形的程度不一样, 造成各种缺陷, 使结构也发生了变化。

材料结构变化是由量变到质变的过程, 开始往往从量变起步, 当外因终止变化时, 有时结构可能会持续变化一段时间, 但一般结构也就终止了变化。如果外因变化超过一定限度时, 结构就会发生质变, 例如会使晶体结构类型发生很大变化。在环境因素变化开始时, 有时会出现孕育期, 孕育期只是结构变化前的准备或微小的量变过程, 过程积累能量, 一旦克服能垒就会发生质变。结构变化的速度与环境因素变化的数量大小及变化速度有关系。

(3) 材料结构总是有使本身保持稳定状态和平衡结构的趋向。材料结构的稳定趋向是指任何材料系统都有使结构保持能量最低状态的趋向。能量状态越低, 结构也就越稳定。只有结构各要素间相对稳定的联系, 才构成材料的结构, 否则结构就会分解和破坏, 也无结构存在的可能了。材料结构可分为稳定状态、亚稳定状态和不稳定状态, 如图 1-1 所示。例如钢铁材料在高温时, 液体的钢水或铁水是稳定状态; 更高温度时, 则气态是稳定状态; 较低温度时, 稳定状态变成固态。再仔细研究, 在固态的不同温度下还存在不同组织结构的稳定状态。稳定可分静态稳定和动态稳定。对材料结构而言, 变化是绝对的, 也就是说不稳定是绝对的。

根据变化过程的方向和平衡程度, 材料结构可分为平衡结构和非平衡结构。平衡结构是指构成材料结构各部分之间的联系、排列方式在某一条件下是相对稳定不变的。非平衡结构是指材料结构经常保持着对环境因素的敏感性、可变性。材料结构进行自发变化过程的方向和限度可用热力学参量熵、自由能和化学势来判断, 这些概念这里不作深入讨论。

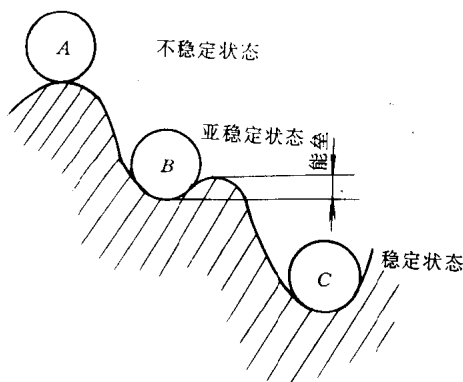


图 1-1 不同状态示意图

(4) 材料结构由各种结构要素排列组合成一定的结构层次。材料结构内部是按层次排列的, 可把复杂的结构分成多个层次或不同等级的结构来分析研究。在材料结构层次的研究中, 一般是在原子级水平上进行的。

现以金属晶体材料的结构层次模型为例说明材料结构的层次排列。从图 1-2 的模型中看出,排列顺序是从最基层的原子→晶格(固溶体、化合物、单质)→晶粒→相→组织→金属的晶体材料。结构层次犹如一座金字塔,不同的结构要素分布在不同的层次级别上,中间存在着各种实际存在的缺陷。金属材料较多的是以相或组织作为基本结构要素来讨论。相的数量、组成、分布是影响材料性能的基本因素。更为基础的一个层次是晶格,晶格说明原子在空间规则排列的不同方式。组元原子的相互结合形成了不同的固溶体、化合物或单质,它们具有不同的晶格结构,对性能有很大的影响。缺陷是结构不可忽视的一个重要内容,它对性能影响也相当大。

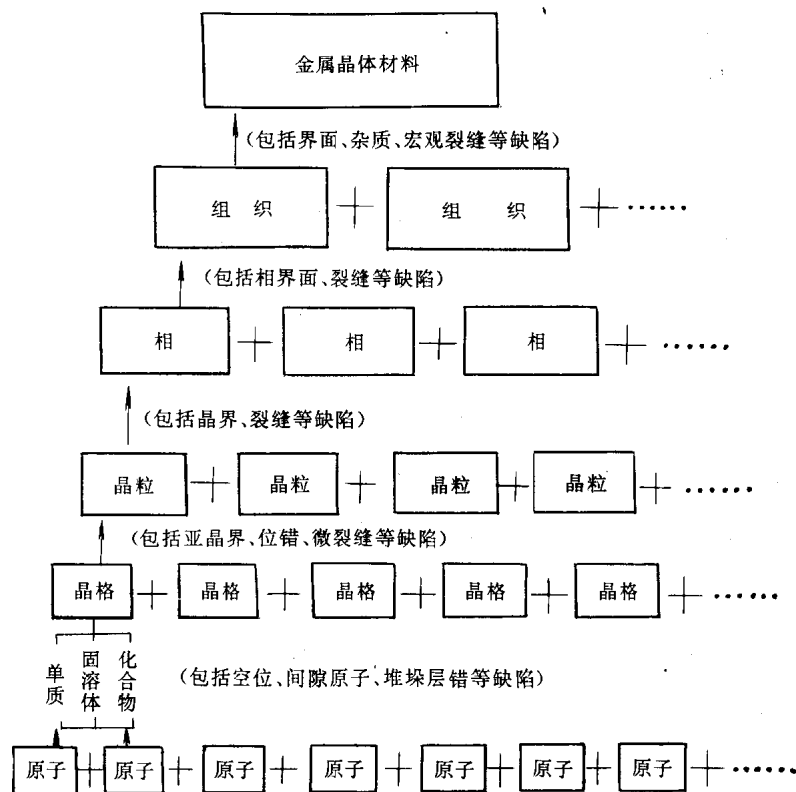


图 1-2 金属晶体的结构层次模型

材料结构具有相对性的特点,组成结构的要素是相对于不同结构层次而言,它们在材料的同一或不同的结构层次上。在材料结构的无限层次中,高级系统的结构要素包含低一级系统的结构,并对低一级有着制约性;低一级结构又是高级的基础。材料的结构层次性决定了它的相对性。在材料的加工与使用过程中,可应用以上材料结构特性的规律,以达到更好的效果。

第四节 材料结构的结合键

一、结合键的分类

组成材料的原子、分子或离子互相作用而联系在一起。由于电子运动使原子产生集合的

结合力称为化学键，可分为离子键、共价键、金属键三种。它们是固体材料主要的结合键力。另一类是属于物理键，包括分子键和氢键，它们在高分子材料中起重大作用，如表 1-1 所示。

表 1-1 结合键的特性

键 名 特 性	离 子 键	共 价 键	金 属 键	分 子 键
结构特点	无方向性或方向性不明显、配位数大	方向性明显，配位数小，密度小	无方向性，配位数大，密度大	键无方向性，分子密堆
力学性能	强度高、劈裂性良好，硬度大	强度高，硬度大	有各种强度、有塑性	强度低、硬度小
热学性能	熔点高，膨胀系数小，熔体中有离子存在	熔点高，膨胀系数小，熔体中有的含有分子	有各种熔点，导热性好，液态的温度范围宽	高膨胀率、低熔点，熔体内为分子
电学性能	绝缘体，熔体为导体	绝缘体，熔体为非导体	导体（有自由电子）	绝缘体，熔体不导电
光学性能	与各构成离子的性质相同，对红外线的吸收强，多为无色和浅色透明的	折射率大，同气体的吸收光谱很不同	不透明，有金属光泽	性质为各分子的性质
键强度	中强至强	中强至强	各种强度	分子间键弱
典型举例	氯化钾	金刚石	铜、铝	有机分子晶体

二、工程材料的结合键及其分类和特点

工程材料中有的是一种键结合，有的是二种或几种键结合。

（一）金属材料

纯金属及其合金，其结合键主要是金属键，有时也含有共价键和离子键。纯金属分两种，一种是内电子壳层完全填满或完全空着的那些元素，属于简单金属，其结合键完全为金属键；另一种内电子壳层未完全填满的元素属于过渡金属，其结合键为金属键和共价键的混合，但以金属键为主。所以工程用金属材料的结合键基本上为金属键。一般原子作周期规则排列为金属晶体，但在特定条件下制造的金属材料也可以是非晶体。纯金属和合金分两大部分：

1. 黑色金属 铁和以铁为基的合金（钢、铸铁和铁合金）应用最广，约占整个结构和工具材料的 90% 以上。工程中使用时它的力学性能比较优越，价格也较便宜。

2. 有色金属 除黑色金属以外的所有金属及合金，可分为：轻金属、易熔金属、难熔金属、贵金属、铀金属、稀土金属和碱土金属。最常用是铝、铜、钛及其合金。一般称为有色金属。

（二）陶瓷材料

陶瓷材料是一种或多种金属同一种非金属元素（通常为氧）的化合物。其中较大的氧原子为陶瓷的基质，较小的金属（或半金属如硅）原子处于氧原子之间的空隙里。氧原子同金属原子化合时形成很强的离子键，同时存在有一定成分的共价键，但离子键是主要的。因此陶瓷的硬度和稳定性很高，而脆性大。

陶瓷是人类应用最早的固体材料，坚硬、稳定，可制工具、用具，特殊情况还可作结构材料。陶瓷材料属于无机非金属材料。大部分含有硅和其它元素的各种化合物，通称为硅酸

盐材料,包括无机玻璃(硅酸盐玻璃)、玻璃陶瓷(微晶玻璃)和陶瓷三种。工程上应用最广的是陶瓷,可作为结构和工具材料。工业陶瓷材料分为:

1. 普通陶瓷(或传统陶瓷) 主要为硅、铝氧化物的硅酸盐材料。主要用于日用、建筑、电器、化工、隔热、保温、过滤……。
2. 特种陶瓷(或新型陶瓷) 主要为纯氧化物、碳化物、氮化物、硅化物等烧结材料。具有独特的力学及物理、化学性能。可制作电容器及压电、磁性、电光、高温陶瓷制品。
3. 金属陶瓷 主要指用陶瓷生产方法制造的金属与碳化物或其它化合物构成的粉末材料。

(三) 高分子材料

高分子材料又叫聚合物,它是由非金属和半金属元素原子以很强的共价键结合成低分子化合物单体,然后由单体聚合成相对分子质量特别大的大分子链,大分子与大分子之间的结合键有分子键(范德瓦尔斯键),作用力不大,但大分子链很长,接触面大,相互交缠,所以结合力仍不可忽视,分子间最强的相互作用键力乃是氢键。

高分子材料主要指有机合成材料,碳元素(通常还含有氢)作为其主要结构组合。它们具有较高的强度、良好的塑性、强的耐腐蚀性及绝缘性、密度小等优良性能,发展很快,应用极广。主要分为:

1. 塑料 主要指强度、韧性和耐磨性较好的可制造机器零件或构件的工程塑料。分热塑性和热固性塑料两种。
2. 橡胶 主要指经硫化处理弹性特别优良的聚合物,有通用和特种橡胶两种。
3. 合成纤维 指强度很高的单体聚合而成的聚合物纤维材料。

(四) 复合材料

复合材料由两种或两种以上材料通过复合工艺组合而成,组元可为各种材料,所以其结合键非常复杂。复合材料可分功能和结构复合材料;也可分为非金属基和金属基两类。常用的是结构复合材料,大量使用以高聚物为基体的复合材料,应用最广的是各种纤维增强复合材料。它具有比强度、比模量高,抗疲劳、减震、耐高温、抗断裂等优良性能。

复合材料一般由基体和增强相组成,它的某些性能比各组成相的性能都好。在强度、刚度和耐蚀性方面比单纯的金属、陶瓷和聚合物都优越,是一类独特的工程材料,发展前景广阔。

如果以上述的四种键为顶点作一个四面体,就可以把材料的结合键范围示意地表示在这个结合键四面体上,如图 1-3 所示。

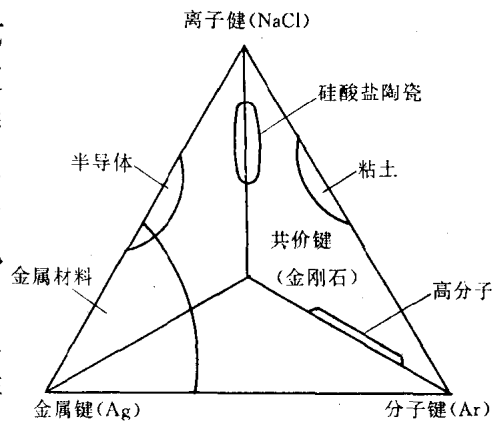


图 1-3 结合键四面体

第五节 材料结构的类型

一、结构类型

材料的原子(离子或分子)在空间有着不同的排列,从而形成了晶体、非晶体等不同的

结构类型。

(一) 晶体

晶体材料的原子（离子或分子）在空间呈有规则的、周期的长程有序（纳米数量级）排列。晶体一般具有以下特点：①具有规则的外形；②有固定的熔点；③有各向异性（指单晶体）。

(二) 非晶体

非晶体的原子（离子或分子）在空间呈无规则的短程（纳米数量级）有序排列。它和瞬间的液体结构相同，典型材料有玻璃、松香、金属玻璃等。非晶体材料的共同特点是：①长距离考察为无序结构，但短程有序，物理性质表现为各向同性；②没有固定的熔点；③热导率和热膨胀性均小；④塑性形变大；⑤组成的变化范围大。

从理论上讲，不同条件下材料都应该能够形成晶体，也能形成非晶体。但在实际上并非如此，例如金属材料，熔融态的金属原子扩散和迁移非常容易，液体粘度很小，冷却时结晶能力很强，很难形成非晶体金属。而熔融的二氧化硅（ SiO_2 ）则粘度很高，原子迁移很困难，冷却时就很容易形成非晶体。但在特定条件下也可以转化，如金属液体在高速冷却下可以得到非晶态金属，玻璃适当热处理可形成晶体玻璃。有些材料可看成是有序和无序的中间状态，如塑料、液晶等。

二、几何晶体学的基本概念

(一) 晶格和晶胞

把组成晶体的原子（离子、分子或原子团）抽象成质点，这些在晶体中几何环境和物质环境相同的等同点，在三维空间排列的阵式就形成了空间点阵。用一些假想的空间直线把这些点连接起来，构成了三维的几何格架，称为晶格。从晶格中取出一个反映点阵几何特征的最基本单元，称为晶胞，如图 1-4 所示。

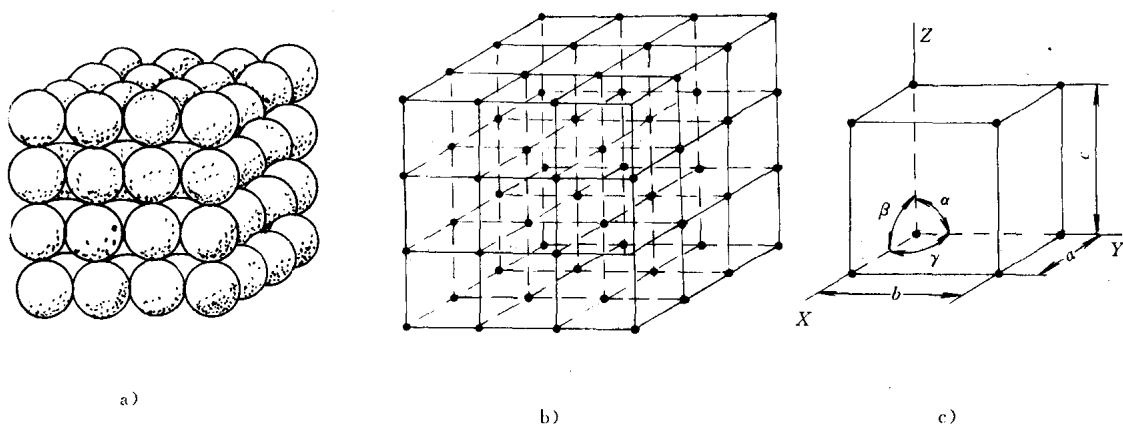


图 1-4 晶体、晶格和晶胞示意图（简单立方晶体）

a) 晶体 b) 晶格 c) 晶胞

表征晶胞特征的参数有六个：棱边 a 、 b 、 c ；棱边夹角 α (c 、 b 间)、 β (a 、 c 间)、 γ (a 、 b 间)。这六个参数叫做晶胞常数。通常又把 a 、 b 、 c 称为晶格常数。

(二) 晶系

按照六个晶胞参数组合的可能方式或根据晶胞自身的对称性, 可将晶体结构分为七个晶系, 如表 1-2 所示。布拉维证明, 七个晶系中存在七种简单晶胞 (晶胞原子数为 1) 和七种复合晶胞 (晶胞原子数为 2 以上), 共 14 种晶胞, 如图 1-5 所示。

表 1-2 晶系

晶 系	棱 边 长 度 及 夹 角 关 系	举 例
三 斜	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	K_2CrO_7
单 斜	$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	$\beta\text{-S}, CaSO_4 \cdot 2H_2O$
正 交	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$\alpha\text{-S}, Ga, Fe_2C$
六 方	$a_1 = a_2 = a_3 \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	Zn, Cd, Mg, MiAs
菱 方	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	As, Sb, Bi
四 方	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$\beta\text{-Sn}, TiO_2$
立 方	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Fe, Cr, Cu, Ag, Au

(三) 晶面与晶向

不同晶体结构类型的材料其性能有明显的差异, 而且在同一种类型的晶格的不同方向上性能也不同, 为了描述这种差异, 提出了晶向与晶面的概念。

1. 晶面与晶面指数 晶体中各种方位的原子平面叫晶面, 表示晶面在空间的确定位置的参数叫晶面指数。晶面指数按下列步骤确定, 如图 1-6 所示。

(1) 以晶格中某一原子为原点 (注意不要把原点放在所求晶面上), 以晶胞的三个棱边作为三维坐标的坐标轴, 以相应的晶格常数为测量单位, 求出所求晶面在三个坐标上的截距 A 、 B 、 C 。

(2) 将所得的三个截距值变为倒数。

(3) 将所得数值化为最简整数 h 、 k 、 l , 用圆括号括起, 就表示该晶面和与之平行的一组晶面的晶面指数。

应该注意几点: ①晶面与某坐标轴平行时, 其在此轴上截距为 ∞ ; ②坐标原点及坐标轴可在点阵中平移, 平移后的原点必须还是点阵上的结点; ③晶面指数都是整数, 这是由点阵的周期性所决定的; ④当截距为负值时, 相应指数上冠以负号, 如 $(1\bar{1}1)$ 。互相对称的一族原子或分子排列完全相同的所有晶面叫做一个晶面族, 其通常表示为 $\{h, k, l\}$ 。

2. 晶向与晶向指数 晶体中连接原子、离子或分子点阵的直线所代表的方向称为晶向。表示晶向在空间确定位置的参数称晶向指数, 如图 1-7 所示。确定方法如下:

(1) 以晶格中某原子为原点确定三维坐标, 通过原点引平行于所求晶向的直线。

(2) 以相应的晶格常数为测量单位, 求直线上任意一节点的三个坐标值。

(3) 将所求数值化为最简整数, 以 u 、 v 、 w 表示, 加一方括号即为所求的晶向指数。

如果坐标值为负值, 则在指数上方冠以负号, 如 $[u\bar{v}w]$ 。用 $\langle u \cdot v \cdot w \rangle$ 表示原子、离子或分子排列相同的晶向族。

三、配位数和致密度

通常用配位数和致密度来表征晶体中原子排列的紧密程度, 它们的数值愈大, 表示晶体中原子排列愈紧密。

(一) 致密度