

材料导论

主 编 张 会

副主编 李海娃



科学出版社

材 料 导 论

主 编 张 会

副主编 李海娃

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书从材料对人类文明发展的重要性出发,阐述了材料的结构、性能、制备、应用及其相互关系,并介绍了近年来国内外材料领域的新理论、新成果和新发展。

本书共 16 章,内容包括:绪论、金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料、高性能结构材料、功能陶瓷、先进复合材料、纳米材料、新型功能材料、电子信息材料、生物医用材料、智能材料、新型建筑材料、新能源材料和生态环境材料。

本书是高等院校材料类专业学生的入门教材,也可作为其他工科类专业学生的素质教育教材,同时可供相关的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料导论/张会主编. —北京:科学出版社, 2019.11

ISBN 978-7-03-063167-1

I. ①材… II. ①张… III. ①材料科学 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 249162 号

责任编辑:朱晓颖 陈 琼 / 责任校对:王萌萌

责任印制:张 伟 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2020 年 1 月第二次印刷 印张:19 1/2

字数:500 000

定价:59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

长期以来,材料业与制造业休戚与共、密不可分。材料是制造业发展的重要基础,任何一种高新技术的突破都必须以该领域的新材料技术突破为前提,制造业的技术进步和产业结构调整离不开新材料技术的推动与革新。实施“中国制造 2025”是推动我国从制造大国向制造强国转变的第一步,材料作为保障产品质量的最基本条件,是我国实现制造强国的关键支撑。

“中国制造 2025”的发布对材料产业发展提出了更高的要求,同时也对高等学校人才的培养有了新的要求。高等教育应着力于培养高素质、复合型、具有创新精神的工程技术人才,既具有坚实的基础知识,也具有宽广的专业面向。为此我们提出向工科类专业学生开设材料类素质教育课程的构想,这一构想得到陕西理工大学教学指导委员会的认可,并获得资助。《材料导论》的编写工作由此启动。

本书力求从材料的四大要素(结构、性能、制备和应用)出发阐述各类材料,使学生认识和理解材料科学与工程中的问题,为材料的研发、选择和使用打下坚实的基础。为体现素质教育课程的科普性、精炼性和前沿性,作者在本书编写中对其结构和编写重点进行了优化。

本书内容分为绪论、传统材料和新材料三个部分:绪论部分(第 1 章)重点介绍材料与人类文明和社会发展的关系,以及材料的结构和性能基础知识;传统材料部分(第 2~5 章)介绍传统材料的制备、结构、性能和应用,偏重基础理论;新材料部分(第 6~16 章)大量引用最新的研究成果,偏重于介绍新材料的应用。

全书共分 16 章。第 1 章、第 2 章、第 6 章和第 13 章由李海娃编写,第 3 章、第 7 章、第 10 章和第 16 章由罗清威编写,第 4 章、第 12 章和第 14 章由陈立贵编写,第 5 章、第 8 章、第 11 章和第 15 章由王玉梅编写,第 9 章由张会编写。全书由张会主编,李海娃为副主编。在编写过程中,还得到许多同志的热情帮助和大力支持,在此一并表示衷心感谢。

限于作者水平,书中的疏漏和不足仍在所难免,敬希广大读者批评指正。

作 者

2019 年 7 月

目 录

第 1 章 绪论	1	3.3 无机非金属材料的结构与性能	49
1.1 材料与人类文明	1	3.3.1 陶瓷的结构与性能	49
1.2 材料的定义与分类	3	3.3.2 玻璃的结构和性能	50
1.3 材料与生态环境	3	3.3.3 水泥的结构和性能	51
1.3.1 金属材料的腐蚀与防护	4	3.4 无机非金属材料的应用	52
1.3.2 其他材料与环境的相互作用	4	3.4.1 陶瓷的应用	52
1.4 材料的结构和性能	5	3.4.2 玻璃的应用	54
1.4.1 材料的结构	6	3.4.3 水泥的应用	56
1.4.2 材料的性能	9	3.4.4 其他无机非金属材料的应用	58
第 2 章 金属材料	21	第 4 章 高分子材料	59
2.1 概述	21	4.1 概述	59
2.1.1 应用与特性	21	4.2 高分子的基本概念	61
2.1.2 资源的枯竭与新材料的崛起	22	4.2.1 高分子的定义	61
2.1.3 金属材料的分类	23	4.2.2 高分子的命名	61
2.2 金属的晶体结构与性能	23	4.2.3 高分子的分类	62
2.2.1 金属晶体结构	23	4.3 天然高分子	63
2.2.2 晶体结构与金属性能的关系	26	4.3.1 天然多糖	63
2.3 黑色金属材料	26	4.3.2 天然橡胶	66
2.3.1 碳素钢	26	4.3.3 蛋白质与核酸	66
2.3.2 低合金钢和合金钢	30	4.4 半天然高分子	68
2.3.3 铸铁	33	4.4.1 赛璐珞的发现	68
2.4 有色金属及其合金	35	4.4.2 天然橡胶的硫化	68
2.4.1 铝及铝合金	35	4.5 合成高分子的制备方法	69
2.4.2 铜及铜合金	37	4.5.1 链式聚合反应	69
2.4.3 钛及钛合金	39	4.5.2 缩聚反应(逐步聚合反应)	70
2.4.4 轴承合金	40	4.5.3 高分子的侧基/端基反应	70
第 3 章 无机非金属材料	42	4.5.4 高分子的共混	70
3.1 概述	42	4.6 高分子材料的结构与性能	71
3.1.1 陶瓷的概念及分类	43	4.6.1 高分子材料的结构	71
3.1.2 玻璃的概念及分类	44	4.6.2 高分子材料的热性能	75
3.1.3 水泥的概念及分类	45	4.6.3 高分子材料的力学性质	77
3.2 无机非金属材料的制备	45	4.6.4 高分子材料的电学性质	79
3.2.1 陶瓷的生产工艺	45	4.6.5 高分子材料的老化与防老化	80
3.2.2 玻璃的生产工艺	47	4.7 高分子材料的应用	80
3.2.3 水泥的生产工艺	48	第 5 章 复合材料	84
		5.1 概述	84

5.1.1	复合材料的定义	84	7.3	铁电陶瓷	118
5.1.2	复合材料的分类	85	7.4	导电陶瓷	121
5.1.3	复合材料的命名	86	7.5	多孔陶瓷	122
5.2	复合材料的结构和性能	86	7.6	磁性陶瓷	124
5.2.1	复合材料的基体	86	7.7	生物陶瓷	125
5.2.2	复合材料的增强体	88	7.7.1	玻璃陶瓷及生物活性玻璃	125
5.2.3	复合材料的界面	93	7.7.2	生物惰性陶瓷	126
5.3	复合材料的成型工艺	94	7.7.3	可吸收生物陶瓷	126
5.3.1	挤出成型	94	7.7.4	牙科陶瓷	127
5.3.2	注射成型	95	7.8	敏感陶瓷	127
5.3.3	压制成型	96	7.8.1	热敏陶瓷	128
5.3.4	缠绕成型	96	7.8.2	气敏陶瓷	129
5.3.5	拉挤成型	97	7.8.3	压敏陶瓷	130
5.3.6	手糊成型与树脂传递模塑成型	97	7.8.4	湿敏陶瓷	131
5.4	典型复合材料的性能及应用	98	第 8 章	先进复合材料	134
第 6 章	高性能结构材料	101	8.1	概述	134
6.1	概述	101	8.2	金属基复合材料	136
6.2	高性能金属结构材料	101	8.2.1	发展史简介	136
6.2.1	超级钢	101	8.2.2	性能	136
6.2.2	先进铝合金	102	8.2.3	应用举例	137
6.2.3	先进钛合金	102	8.3	高分子基复合材料	140
6.2.4	高温合金	103	8.3.1	发展史简介	141
6.2.5	高性能镁合金	104	8.3.2	性能	141
6.2.6	其他高性能金属结构材料	105	8.3.3	应用举例	142
6.3	高性能结构陶瓷	105	8.4	陶瓷基复合材料	144
6.3.1	氧化物陶瓷	106	8.4.1	分类	144
6.3.2	微晶玻璃	108	8.4.2	性能	145
6.3.3	碳化物陶瓷	110	8.4.3	应用举例	146
6.3.4	氮化物陶瓷	112	8.5	水泥基复合材料	147
6.3.5	硼化物陶瓷	114	8.6	碳基复合材料	149
6.4	特种工程塑料	114	8.6.1	C/C 复合材料用碳纤维的选择	149
6.4.1	聚苯硫醚	114	8.6.2	C/C 复合材料的基体	149
6.4.2	聚酰亚胺	114	8.6.3	C/C 复合材料的应用	150
6.4.3	聚醚醚酮	115	第 9 章	纳米材料	152
6.4.4	液晶高分子	115	9.1	概述	152
6.4.5	聚砜	115	9.2	纳米材料的研究进展及应用	152
第 7 章	功能陶瓷	116	9.2.1	纳米材料的研究进展	152
7.1	概述	116	9.2.2	纳米材料的应用	153
7.2	压电陶瓷	116	9.3	纳米粒子的制备方法	156

9.3.1 制备纳米粒子的物理方法	157	11.4.3 光纤的应用	199
9.3.2 制备纳米粒子的化学方法	160	11.5 信息存储材料	201
9.4 一维纳米材料	163	11.5.1 信息存储的概念	201
9.4.1 碳纳米管	163	11.5.2 信息存储技术	201
9.4.2 纳米棒、纳米丝	163	11.5.3 磁存储及磁存储材料	201
9.4.3 同轴纳米电缆	164	11.5.4 光存储及光存储材料	202
9.5 纳米固体材料	164	11.5.5 全息存储及全息存储材料	205
9.5.1 纳米固体材料的分类及其基本构成	164	11.6 信息处理材料	206
9.5.2 纳米固体材料的制备	165	第 12 章 生物医用材料	207
9.5.3 纳米薄膜材料的制备	168	12.1 概述	207
9.5.4 纳米薄膜材料的应用	171	12.1.1 生物医用材料的概念	207
第 10 章 新型功能材料	174	12.1.2 生物医用材料的分类	208
10.1 概述	174	12.2 生物医用金属材料	209
10.2 超导材料	174	12.3 生物医用高分子材料	213
10.2.1 超导体的物理特性	175	12.3.1 人工脏器	213
10.2.2 实用化超导材料的特点	175	12.3.2 修复用高分子材料	214
10.2.3 超导材料的应用	175	12.3.3 高分子医疗用品	215
10.3 磁性材料	178	12.3.4 高分子药物缓释放与送达体系	216
10.3.1 软磁材料	179	12.4 生物医用无机材料	216
10.3.2 硬磁材料	179	12.4.1 生物医用无机材料的分类	217
10.3.3 磁流体	180	12.4.2 生物惰性医用无机材料	218
10.3.4 磁记录材料	181	12.4.3 生物活性医用无机材料	218
10.3.5 磁性材料的应用	181	12.4.4 生物降解医用无机材料	220
10.4 碳结构材料	182	12.4.5 纳米生物医用无机材料	221
10.4.1 富勒烯	183	12.5 生物医用复合材料	222
10.4.2 碳纳米管	184	12.5.1 生物无机与无机复合材料	223
10.4.3 类金刚石薄膜	186	12.5.2 生物无机与高分子复合材料	223
第 11 章 电子信息材料	190	12.5.3 生物无机与金属复合材料	224
11.1 概述	190	第 13 章 智能材料	225
11.2 信息监测和传感材料	191	13.1 概述	225
11.2.1 探测器材料	191	13.2 智能压电材料	225
11.2.2 传感器材料	193	13.2.1 压电陶瓷	225
11.3 信息显示材料	196	13.2.2 压电高分子	227
11.3.1 白光 LED 用稀土发光材料	197	13.2.3 压电复合材料	227
11.3.2 真空紫外发光材料	197	13.3 智能磁致伸缩材料	228
11.3.3 稀土闪烁晶体	197	13.3.1 智能磁致伸缩合金	228
11.4 信息传输材料	198	13.3.2 电致伸缩陶瓷	229
11.4.1 光纤概述	198	13.4 智能形状记忆材料	230
11.4.2 光纤的分类	199		

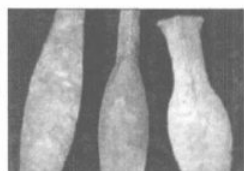
13.4.1 形状记忆合金·····	230	14.5.5 新型环保涂料·····	259
13.4.2 形状记忆陶瓷·····	231	第 15 章 新能源材料 ·····	261
13.4.3 形状记忆高分子·····	232	15.1 概述·····	261
13.5 智能流变体 ·····	232	15.1.1 世界能源状况与面临的挑战·····	261
13.5.1 电流变体·····	232	15.1.2 新能源与材料·····	265
13.5.2 磁流变体(液)·····	236	15.2 储氢材料 ·····	266
13.5.3 电磁流变体·····	237	15.2.1 储氢材料的定义和分类·····	266
13.6 智能凝胶 ·····	239	15.2.2 典型储氢材料及其应用·····	267
13.7 智能光导纤维 ·····	239	15.3 新型二次电池材料 ·····	269
13.7.1 玻璃光纤·····	240	15.3.1 Ni/MH 二次电池(简称 Ni/MH 电池)·····	269
13.7.2 塑料光纤·····	241	15.3.2 锂离子二次电池(简称锂离子 电池)·····	270
第 14 章 新型建筑材料 ·····	243	15.4 太阳能电池材料 ·····	272
14.1 概述·····	243	15.4.1 太阳能电池工作原理·····	272
14.2 新型墙体材料 ·····	243	15.4.2 太阳能电池发展简介·····	272
14.2.1 砌墙砖·····	246	15.4.3 太阳能电池材料及其应用·····	273
14.2.2 墙用砌块·····	247	15.5 燃料电池材料 ·····	276
14.2.3 轻质隔墙板·····	247	15.5.1 燃料电池的分类·····	277
14.2.4 复合墙体·····	247	15.5.2 燃料电池材料及应用·····	278
14.2.5 节能型墙体材料·····	248	第 16 章 生态环境材料 ·····	280
14.3 新型防水和密封材料 ·····	250	16.1 概述·····	280
14.3.1 概述·····	250	16.1.1 生态环境材料的概念·····	280
14.3.2 防水卷材·····	250	16.1.2 生态环境材料的分类·····	281
14.3.3 防水涂料·····	251	16.1.3 生态环境材料的评价机制·····	281
14.3.4 建筑密封材料·····	252	16.2 环境相容材料 ·····	283
14.3.5 刚性防水、堵漏止水材料和 灌浆材料·····	253	16.2.1 生态建材·····	283
14.3.6 特种防水材料·····	253	16.2.2 环境相容性农药及表面 活性剂·····	285
14.4 新型建筑装饰材料 ·····	253	16.2.3 仿生物材料·····	286
14.4.1 建筑装饰陶瓷·····	254	16.2.4 绿色包装材料·····	287
14.4.2 建筑装饰玻璃·····	254	16.2.5 纯天然材料·····	289
14.4.3 金属装饰材料·····	255	16.3 生物降解材料 ·····	290
14.4.4 装饰塑料·····	255	16.4 环境工程材料 ·····	293
14.4.5 装饰砂浆和混凝土·····	256	16.4.1 环境净化材料·····	293
14.4.6 建筑装饰石材·····	256	16.4.2 环境替代材料·····	295
14.4.7 建筑装饰木材·····	256	16.4.3 环境修复材料·····	296
14.4.8 生态建筑装饰材料·····	256	参考文献 ·····	297
14.5 新型建筑涂料 ·····	257		
14.5.1 外墙涂料·····	257		
14.5.2 内墙涂料·····	258		
14.5.3 地面涂料·····	258		
14.5.4 特种涂料·····	259		

第 1 章 绪 论

1.1 材料与人类文明

材料是人类赖以生存和得以发展的重要物质基础，是人类生活和生产中不可分割的组成部分。人们的周围到处都是材料，材料不仅存在于人类的现实生活中，而且扎根于人类的文化和思想领域。材料、能源和信息是客观世界的三大要素，也是构成现代文明的三大支柱。

然而人类对材料的认识是逐步深化的。历史上，人类对材料认识的深入促使人类文明从石器时代、陶器时代、青铜时代走向铁器时代(图 1.1)。



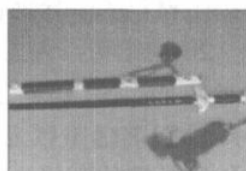
(a) 石质工具——石器时代



(b) 马家窑彩陶——陶器时代



(c) 后母戊鼎——青铜时代



(d) 干将莫邪剑——铁器时代

图 1.1 材料与人类文明

距今约 300 万年~约 1 万年，人类开始以打制石器作为工具，此阶段称为旧石器时代。约 1 万年以前，人类知道对石头进行加工，使之成为更精致的器皿和工具，从而进入新石器时代。在新石器时代，人类还发明了用黏土成型、再火烧固化而制成陶器。同时，人类开始用皮毛遮身，中国大约在 8000 年前就开始用蚕丝制作衣服，印度在 4500 多年前开始培植棉花。人类使用的这些材料都是促进人类文明的重要物质基础。

在新石器时代，人类已经知道使用天然金和铜，但因其尺寸较小，数量也少，不能成为大量使用的材料。后来，人类在寻找石料的过程中认识了矿石，在烧制陶器的过程中又还原出金属铜和锡，创造了炼铜技术，生产出各种青铜器物，从而进入青铜时代。这是人类大量利用金属的开始，是人类文明发展的重要里程碑。

世界各地开始青铜时代的时期前后不一，希腊约在公元前 3000 年，埃及约在公元前 2500 年，中国在夏朝(公元前 21 世纪~前 17 世纪)，欧洲约在公元前 1800 年。中国在商周时期(公元前 17 世纪初~前 256 年)即进入青铜器的鼎盛时期，在技术上达到了当时世界的顶峰。例如，河南安阳殷墟出土的商朝晚期的后母戊鼎(重 832.84kg)，就反映出当时中国青铜铸造的高超技术和宏大规模。又如，在湖北随县(今随州市)曾侯乙墓出土的战国(公元前 475~前 221 年)初期制造的编钟，亦充分反映出当时中国在冶金方面已达到相当高的工艺和技术水平。冶金术的迅速发展提高了社会生产力，推动了社会进步，并促使城市诞生。城市最早出现于公元前 3000 年的美索不达米亚，随后出现在埃及、印度河流域及中国华北地区。这标志着人类文明又向前跨进了一大步。

4500 年前，人类已开始用铁。公元前 12 世纪，在地中海东岸已有很多铁器。由于铁比铜更容易得到、更好利用，故在公元前 10 世纪铁工具已比青铜工具更为普遍，人类从此由青

铜时代进入铁器时代。公元前 8 世纪,已出现用铁制造的犁、锄等农具,生产力提高到一个新的水平。中国在春秋(公元前 770~前 476 年)末期冶铁技术有了很大突破,遥遥领先于世界其他地区。例如,利用生铁经退火制造韧性铸铁及以生铁制钢技术的发明,标志着中国生产力的重大进步。这些发明对战国和秦汉时期农业、水利与军事的发展起了重大作用,成为促进中华民族统一和发展的重要因素之一。这些技术从战国时期至汉朝相继传到朝鲜、日本和西亚、欧洲等国家和地区,推动了整个世界文明的发展。

18 世纪蒸汽机的发明和 19 世纪电动机的发明,使材料在新品种开发和规模生产等方面发生了飞跃。例如,1856 年和 1864 年先后发明的转炉和平炉炼钢,使世界钢的产量从 1850 年的 6 万 t 突增到 1900 年的 2800 万 t,大大促进了机械制造、铁路交通的发展。随后不同类型的特殊钢种也相继出现,如 1887 年的高锰钢、1890 年的 18-4-1 高速钢、1903 年的硅钢及 1910 年的铬镍不锈钢等。这些都是现代文明的标志,人类进入了钢铁时代。在此前后,银、铅、锌也得到大量应用,而后铝、镁、钛和稀有金属相继问世,从而使金属材料在 20 世纪中占据了材料的主导地位。

20 世纪初,人工合成高分子材料问世,如 1909 年的酚醛树脂(胶木)、1925 年的聚苯乙烯、1931 年的聚氯乙烯及 1941 年的尼龙等,发展十分迅速,如今世界人工合成高分子材料年产量在 1 亿 t 以上,论体积已超过了钢。有些工业发达国家(如美国)高分子材料年产量的体积已是钢的两倍。所以有人说现在是高分子材料时代。

20 世纪 50 年代,人们通过合成化工原料或特殊制备方法,制造出一系列先进陶瓷,由于它们具有资源丰富、密度小、耐高温、耐磨等特点,很有发展前途,从而成为近三四十年研究工作的重点,且用途在不断扩大,有人甚至认为“新陶瓷时代”即将到来。

高分子材料、现代陶瓷与金属材料各有互相不可替代的性能和功能,从资源情况来看,陶瓷原料几乎取之不尽、用之不竭,高分子原料有再生的优势,金属矿产资源虽只有几百年的探明储量,但如果考虑海洋及地壳深处的资源,也可以说是“无穷无尽”的。目前及将来将是多种材料并存的时代。更有发展前途的是复合材料,因为这类材料具备每种单一材料所不具备的性能,而且可以节约资源,是今后材料发展的主要方向。

事实上,人类很早就利用复合材料了。例如,泥巴中混入碎麻或麦秆用以建造房屋,钢筋混凝土是脆性材料与韧性材料、抗拉材料与抗压材料的结合,玻璃钢是玻璃纤维与树脂的复合,还有碳纤维增强的树脂基复合材料,都是为了提高材料的强度和模量而采取的措施。此外,人们还在发展更高级的复合材料,如金属基、陶瓷基复合材料等。仔细分析发现,几乎所有生物体,如内脏、牙齿、皮肤以及木材、竹子等都是以复合材料的形式构成的,说明这种结构是一种较合理的结构,大有发展前途。

随着科学技术的发展,功能材料越来越重要,特别是半导体材料的出现,促进了现代文明的加速发展。1948 年发明了第一支具有放大作用的晶体管,10 年后又研制成功集成电路,使计算机的功能不断提高,体积不断缩小,价格不断下降;加上高性能的磁性材料不断涌现,激光材料与光导纤维的问世,使人类社会进入了“信息时代”。功能材料品种非常多,包括金属、陶瓷、高分子和复合材料所构成的各种功能材料,且应用范围广,发展非常迅速,成为研究与开发的重点。

总之,人类社会的进步无不与材料密切相关。正是材料的使用、发现、发明和发展,使得人类在与自然界的斗争中,走出混沌蒙昧的时代,发展到科学技术高度发达的今天。因此,人类的文明史也是材料的发展史,材料也是人类文明的里程碑。

1.2 材料的定义与分类

材料一般是指人类用以制造生活与生产所需的物品、器件、构件、机器和其他产品的物质。材料是物质，但不是所有的物质都可以称为材料。例如，燃料和化学原料、工业化学品、食物和药物，一般都不算是材料。只有那些可为人类社会接受而又能经济地制造有用器件的物质才称为材料(图 1.2)。但是这个定义也并不那么严格，如炸药、固体火箭推进剂，有人便称为含能材料。

由于材料的种类繁多，用途广泛，因此它有许多分类方法。

依据材料的来源可将材料分为天然材料和人造材料两类。目前正在大量使用的天然材料只有石料、木材、橡胶等，并且用量在逐渐减少，许多原先使用天然材料的领域正在日益被人造材料取代。例如，铁道上的钢筋水泥轨枕在代替枕木，人造橡胶在代替天然橡胶，化学纤维在代替植物纤维等。

从研究材料的角度来看，常按物理化学属性将材料分为金属材料、无机非金属材料、高分子材料和复合材料四大类。金属材料、无机非金属材料、高分子材料因原子间的相互作用不同，在各种性能上表现出极大的差异。它们相互配合、取长补短，构成现代工业的三大材料体系。复合材料则由上述三类材料复合而成，它结合了不同材料的优良性能，在强度、刚度、耐腐蚀性等使用性能方面比单一材料优越，具有广阔的发展前景。

按材料的用途可将材料分为电子材料、航空航天材料、建筑材料、核材料、生物材料等。

按材料的使用性能可将材料分为结构材料 and 功能材料两类。结构材料以力学性能为基础，用于制造以受力为主的构件。当然，结构材料对物理性能和化学性能也有要求，如光泽、热导率、抗辐照能力、抗腐蚀能力、抗氧化能力等。对性能的要求因材料用途而异。功能材料则主要是利用物质独特的物理性质、化学性质或生物功能等而形成的一类材料。

也可按发现的先后顺序将材料分为传统材料和新型材料(又称新材料、先进材料)。前者是指在工业中已批量生产并已得到广泛应用的材料，后者则是指刚投产或正在发展而且有优异性能和应用前景的一类材料。

随着现代科学技术的发展，材料的分类方法也在发展。例如，人们常将能源的开发、转换、运输、储存所需的材料统称为能源材料，也常将信息的接收、处理、储存和传播所需的材料统称为信息材料，又将通过光、电、磁、力、热、化学、生物化学等作用后具有特定功能的新材料称为功能材料，等等。

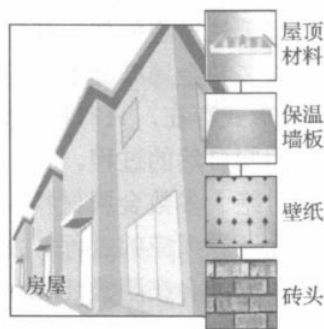


图 1.2 房屋所用到的材料

1.3 材料与生态环境

材料与环境的关系问题涉及两个方面：一是材料的环境劣化，如金属材料的腐蚀、高分子材料的老化、无机材料的侵蚀等；二是材料制造、施工、应用过程中的废气、废液、废渣等对环境的破坏作用。

1.3.1 金属材料的腐蚀与防护

腐蚀是指金属和非金属在周围介质(水、空气、酸、碱、盐、溶剂等)作用下产生损耗与破坏的过程。腐蚀的过程可以是物理过程、化学过程、电化学过程、机械过程或生物学过程等。但无论过程如何,其结果都使产品的使用性能下降甚至丧失,即失效。

大多数金属产品都易受到腐蚀的影响。在自然界,大多数金属都以化合物(氧化物、氮化物等)形式存在,只有极少数以单质形式存在,而腐蚀是使金属化合物回归金属单质的过程,也是回归自然的过程。

对绝大多数金属材料,腐蚀现象发生的实质是电化学反应的过程,即金属在电解质中发生氧化还原反应的过程。发生电化学腐蚀的基本条件是:①金属在电解池的阳极发生氧化;②某种离子会在阴极还原;③阴极与阳极之间存在电位差;④存在电解质;⑤电回路必须闭合(即阴极与阳极必须连通)。上述条件只要一个不满足,电化学腐蚀就不会发生,这也为金属的腐蚀防护指明了途径。

腐蚀防护的三大要素是材料、环境与设计,这三者几乎同等重要。

1) 材料处理

若要设备与结构不腐蚀,积极的办法是选择耐腐蚀的材料,如铝合金、钛合金、不锈钢等。如果不能经济地优选材料,就必须考虑表面处理。最优先考虑的应是氧化膜。但氧化膜只能抗大气腐蚀,不能抗化学试剂腐蚀。

正确选择涂料可以保护金属不受化学侵蚀。涂料包括高分子涂料和陶瓷涂料,一定要保证无气孔、不渗漏。镀层具有耐腐蚀性,但没有一种镀层是无孔或无裂缝的。扩散处理能够提供耐腐蚀性。渗氮和渗铬都可防止钢的大气腐蚀。但不锈钢的渗氮会降低耐腐蚀性。

最后应注意材料的表面粗糙度,一个光洁的表面可以降低间隙腐蚀,还可以减少积垢,排除腐蚀的隐患。

2) 环境控制

影响腐蚀的环境因素有温度、湿度、流体速率、溶液浓度等,这些因素对材料保护的影响都是显而易见的。缓蚀剂是改变环境的重要手段,可以降低阳极的氧化与阴极的还原。缓蚀剂可以被材料物理吸收,也可以被材料化学吸收。缓蚀剂可以分为钝化型、有机型和沉淀型三种。钝化型缓蚀剂是最有效的一种,由铬酸盐或硝酸盐组成,可以在溶解氧存在的情况下被金属表面吸收。铬酸盐价格低廉,广泛用于散热器、发动机体等。

3) 结构设计

周到的结构设计能够避免许多情况下腐蚀的发生,例如,碳钢与不锈钢焊接时在衬套上焊接,用螺钉固定时加一个衬垫,容器不留积垢死角,设计时留出检修的短路线,焊接时不留间隙,管道下边防止积水,保护易受冲刷部位……以上都可以避免电化学腐蚀的产生。反过来,可以利用化学电池作用,采取积极措施对金属结构进行保护,例如,牺牲活泼阳极保护较惰性阴极的方法就属于此类应用。

1.3.2 其他材料与环境相互作用

1. 高分子材料的环境恶化

在热、光、辐射、气候等环境和化学环境作用下,高分子材料会发生各种变化,但变化的实质大都是化学键的断开,因而导致高分子材料的老化。

影响高分子材料性能的环境大致可以分为四类：化学环境、热、光照(主要是紫外线)和高能辐射。一种高分子材料中除高分子化合物以外，还含有许多助剂，以上四种因素对助剂的影响就使问题更为复杂化了。多年来，预测一种材料的使用寿命始终是一个难题。人们设计了各种加速老化实验，却收效甚微。模仿自然条件的加速是否准确，关键在于是否真正模仿了自然。影响老化的因素不止一个，而“加速”往往只能加速一个或几个因素，不能对所有因素进行全面加速。用加热的办法或光、射线辐射的办法，都只能加速某些因素，而忽略了其他因素。因此，高分子材料的环境劣化问题仍有待于深入研究。

2. 环境与废弃高分子材料

人类在使用金属、陶瓷等传统材料时，同样会遇到废弃物对环境的污染问题，但金属材料的再加工很容易，废弃的陶瓷材料除难以降解外，几乎不会对环境造成有害影响，而高分子材料则不同，废弃的高分子材料，无论是橡胶还是塑料都已经成为严重的社会公害。

因此，应采用相对应的手段以减少废弃高分子材料对环境的影响，如减少使用来源、回收再利用、焚烧发电、堆肥与填埋等。但其中最根本和最有效的方法是减少使用来源，尽可能地不产生或少产生高分子垃圾。

3. 陶瓷的环境恶化

陶瓷是环境稳定性最高的材料，但还是会受到来自某些方面的侵蚀。例如，氢氟酸常用来刻蚀玻璃和陶瓷，许多陶瓷会在高温下分解。

在陶瓷中会发生一种解离腐蚀，原理类似金属中的晶界腐蚀、应力腐蚀或电偶电池腐蚀。陶瓷成分复杂，许多成分可以提供电子运动的路径，腐蚀常由此类少量组分引起。热压、反应烧结、化学气相沉积等加工工艺都不要求原料的纯度，发生腐蚀的可能性就更大些。耐火材料中含有玻璃相，且耐火材料相对于玻璃相为阴极。如果二者的电压低于 0.5V，则该耐火材料具有一定的耐腐蚀性；如果电压超过 1.0V，这种耐火材料就不能用了。

玻璃在大气中会发生一种应力腐蚀，其根源是与水蒸气之间的反应。由于氢原子置换了玻璃中的碱金属原子，引起了玻璃中的张力。钠硅玻璃在水蒸气中强度下降得很快。含铅的玻璃在液体中会释放出 PbO 。这一方面造成玻璃的劣化，另一方面造成环境污染。

玻璃纤维由于比表面积大，受侵害的程度远远大于玻璃器件。空气中的水分很容易降低玻璃纤维的强度，所以玻璃纤维往往用高分子材料涂覆。

如果把混凝土也算作一类陶瓷，那么其对环境最有害的因素是盐。在工业国家，每逢天降大雪，就会出动车辆在重要道路撒盐化冰以防止打滑。盐水会对混凝土造成侵蚀，逐渐使道路发生开裂和酥化。人们多年来一直在寻找盐的代用品，据报道，已找到有效的化冰防滑物质，但要完全取代盐尚需时日。在冬季用盐化冰防滑还会持续较长的时期，盐对混凝土的腐蚀还是一个不容忽视的问题。

1.4 材料的结构和性能

按照材料科学对材料要素的定义，材料所表现出来的性能依赖于材料的结构，了解材料的结构是了解材料性能的基础。

1.4.1 材料的结构

1. 聚集态

组成材料的物质都是由大量的粒子(原子、分子、离子等)在空间聚集而成的,这种由粒子在空间聚集起来的物质状态称为聚集态。

不同材料具有不同的聚集态,不同的聚集态下粒子相互结合的方式不同,将粒子由某种力而结合起来的方式称为化学键。不同物质的粒子具有不同的化学键。例如,金属原子间通过金属正离子和自由电子云相结合而形成的金属键、无机非金属材料由共用最外层电子互相结合而形成的共价键、离子化合物中由原子释放最外层电子成为带正离子并接收带负离子而形成的离子键、分子与分子间由于相互吸引而形成的范德瓦耳斯键等。不同的化学键决定了不同物质具有不同的物理化学性质和应用(图 1.3~图 1.5)。

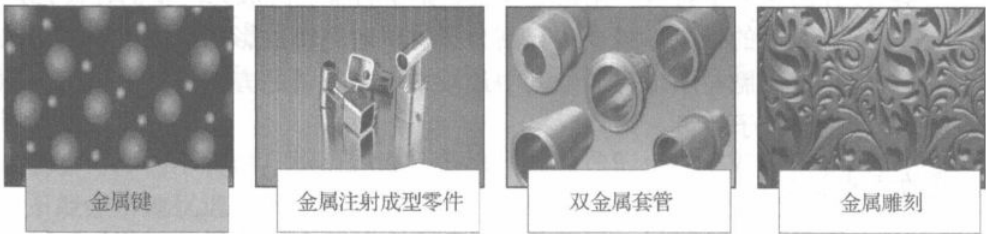


图 1.3 金属键及金属制品

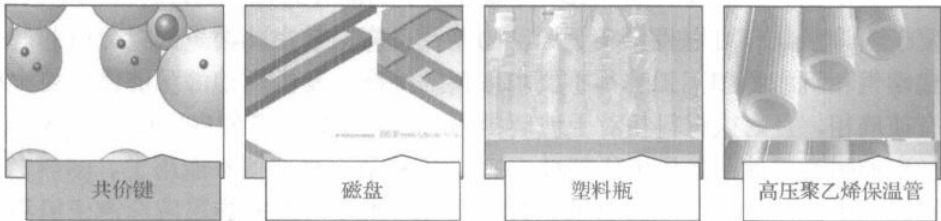


图 1.4 共价键及高分子制品



图 1.5 离子键及陶瓷制品

此外,当原子或分子结合成固体时,它们可能形成两类结构:粒子在空间做有规律排布而形成的晶体和无规律排布而形成的非晶体。大多数金属属于晶体,陶瓷属于单晶体或多晶体,玻璃、某些高分子化合物则属于非晶体。非晶态固体可称为玻璃态,是一种具有无定形结构的物质。不具有明显晶体结构的状态统称为无定形结构或非晶体。通常认为是非晶体的固体有柏油(沥青)、煤焦油沥青、玻璃和某些塑料等,有一部分为晶体或接近于晶体的结构。液体、气体等均属于无定形结构,但也有例外,如液晶。图 1.6 是常见的晶体与非晶体。

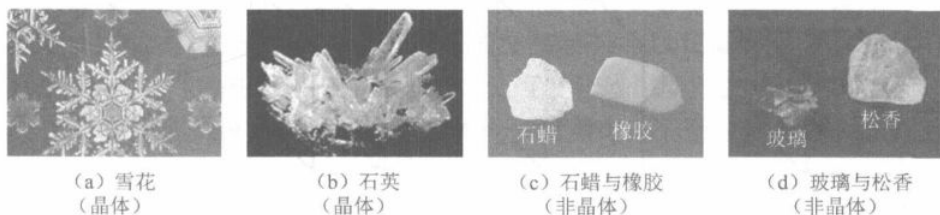


图 1.6 常见的晶体和非晶体

2. 材料的结构层次

材料的结构是指材料的组成单元(原子或分子)之间相互吸引和排斥作用达到平衡时的空间排布,从宏观到微观可分成不同的层次,即宏观组织结构、显微组织结构及微观结构。

(1) 宏观组织结构是用肉眼或放大镜能观察到的晶粒、相的集合状态。

(2) 显微组织结构(或称亚微观结构)是借助光学显微镜、电子显微镜可观察到的晶粒、相的集合状态或材料内部的微区结构,其尺寸为 $10^{-7} \sim 10^{-4} \text{m}$ 。

(3) 比显微组织结构更细的一层结构是微观结构,包括原子及分子的结构以及原子和分子的排列结构。因一般分子的尺寸很小,故把分子结构排列列为微观结构,但对高分子化合物,大分子本身的尺寸可达到亚微观的范围。

3. 晶体结构基础

1) 晶体结构的基本特征

晶体是指粒子按一定规律呈周期性地排列构成的固态物质,即从内部结构——原子(原子团)或分子排列的特征来看,晶体结构的基本特征是原子或分子在三维空间呈周期性规则而有序地排列,即存在长程的几何有序。

固体也可能只由一块结构均匀的大晶体构成,称为单晶体。单晶体是各向异性的均匀物体,具有一定的熔点,生长良好时呈现规则的外形。晶体的宏观形貌可以是一维的、二维的或三维的。

从结构上看,晶体的排列状态由构成原子或分子的几何形状和键型所决定。构成原子为无方向性的球状时(单独的原子)是比较简单的;若为有机物分子等具有方向性,在形成晶体时,其晶体的构成原子或分子的排列状态则相当复杂。构成原子的吸引力与排斥力在达到均衡时相互保持稳定构成晶格,一般晶体的外形有变化,晶格也不会改变。有的晶体的晶形由晶格的三维重复状态而定。生长良好的晶体外形常呈现某种对称性。对称性是自然界许多事物的基本属性之一,晶体外形的宏观对称性是其内部晶体结构微观对称性的表现,它与晶体的性能有深刻的内在联系。

如果将每一个可重复的单位用一个点来表示,就能形成一个有规则的三维点阵,称为空间点阵。空间点阵中的任何一点总是和点阵的其他点有相同的周围环境。前面提到的粒子,在实际晶体中可能是一个原子,也可能由很多原子构成,如某些有机分子晶体。按晶格的边长和晶轴相交的角度等可将晶体分为七大晶系,即立方晶系(又称等轴晶系)、六方晶系、四方晶系、三方晶系、正交晶系(又称斜方晶系)、单斜晶系、三斜晶系等。七大晶系模型如图 1.7 所示,其晶格常数如表 1.1 所示。

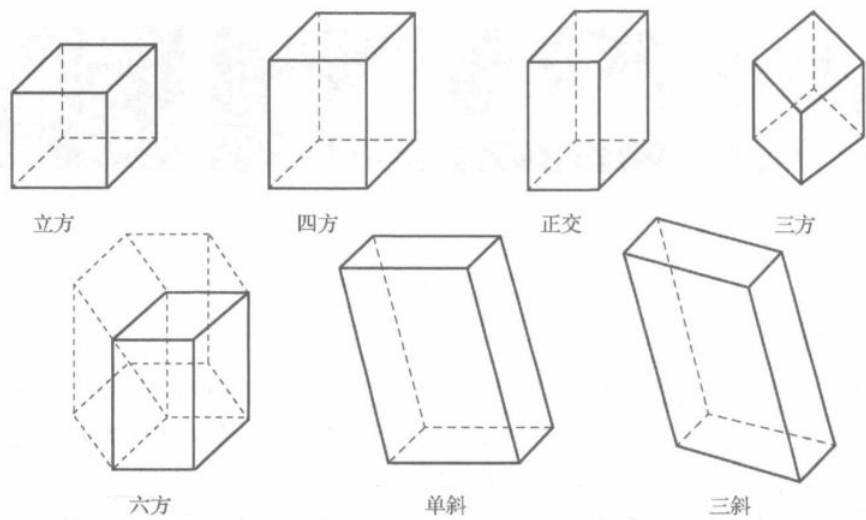


图 1.7 七大晶系模型

表 1.1 七大晶系的晶格常数

晶系	棱边长度及夹角关系	举例
三斜	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma$	$K_2Cr_2O_7$
单斜	$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	$\beta-S, CaSO_4 \cdot 2H_2O$
正交	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$\alpha-S, Fe_3C$
六方	$a_1 = a_2 = a_3 \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	Zn, Cd, Mg, NiAs
三方	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	As, Sb, Bi
四方	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$\beta-Sn, TiO_2$
立方	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Fe, Cr, Cu, Ag, Au

晶体的结构确定之后，得知原子半径 r 即可求出表示晶格大小的常数(晶格常数 a)。晶体中的原子具有规则而有序的排列，因此可以借助 X 射线衍射法确定结构，求出晶格常数，由此来求出原子半径 r 。根据原子半径 r 和晶格常数 a 也可计算出晶体的致密度。

许多固体会以多晶形式存在，如常见的金属及其合金、大多数陶瓷和矿物等均属于多晶体。多晶体是许多单晶组成的聚集体，即由许多取向不同的晶粒组成。在多晶体中，两个晶粒相遇时所产生的界面称为晶界，晶粒和晶界是多晶材料中十分重要的结构因素。多晶材料的晶粒大小悬殊。就其粒径而言可小至微米(如黏土的粒子)甚至纳米(如超细 TiO_2 粒子)，大到厘米(如黄铜的粒子)。

2) 晶体结构的不完整性

对晶体结构描述时认为整个晶体都具有规则排列。而实际上，绝大多数晶体都存在大量的与理想原子排列的轻度偏离，这类不完整性依据其几何形状而分为点缺陷、线缺陷和面缺陷。结构的不完整性会对晶体的性能造成重大影响。

(1) 点缺陷。理想晶体中的一些原子被外界原子所代替，或者在晶格间隙中掺入原子，或者留有原子空位，破坏了有规则的周期性排列，引起质点间势场的畸变，这样造成晶体结构的不完整仅仅局限在原子位置，称为点缺陷。一般分为三类：结构位置缺陷(如空位和间隙原子)、组成缺陷(即杂质原子)和电荷缺陷。空位是晶体中没有被占据的原子位置，而间隙原子是晶体本身的原子占据了间隙位置。间隙原子通常比空位少得多，因为在金属中它所引起的

结构畸变太大。空位的一个非常重要的特点是它们能够与相邻原子交换位置而运动。这为晶体材料的固态相变提供了一种手段,使得原子在高温时可以在固态中进行迁移(即扩散)。

(2)线缺陷。实际晶体在结晶时受到杂质、温度变化或振动产生的应力作用,或晶体受到打击、切削、研磨等机械应力的作用,使晶体内部质点排列变形,原子行列间相互滑移,而不再符合理想晶格的有序排列,形成线状的缺陷,习惯上称为位错。位错对材料的加工性能和使用性能有很大影响,如塑性变形总是借助位错的滑移来完成,固态相变中原子可借助位错线进行扩散,大量位错的塞积可造成材料的强化,等等。

(3)面缺陷。多晶体是由许多结合得并不十分严密的微小晶粒构成的聚集体,每个单独的晶粒都是单晶体,在一个晶粒内,给定的一组原子面在空间具有相同的位向,但其相邻的晶粒具有不同的结晶学位向。这些晶粒之间不是公共面,而是公共棱。原子面从一个晶粒到相邻的晶粒是不连续的,很明显,这样的构造就是一种面缺陷。晶粒之间的边界(称为晶界)是能量较高的结晶不完善的区域,其厚度等于1~2个原子直径。由于晶界的原子堆积不完善,所以杂质原子倾向于偏聚在晶界上,这将改变晶界的能量状态和性能,进而影响材料的加工性能和使用性能。

1.4.2 材料的性能

材料的性能是一种参量,用于表征材料在给定外界条件下的行为,它是材料微观结构特征的宏观反映。由于组成和制备工艺上的差异,各类材料在性能上会存在很大的差异。一般地,三大材料的化学键和性能如表1.2所示。

表 1.2 材料的化学键与性能

材料类别	化学键	性质和性能
无机非金属材料	离子键和共价键	坚硬、耐热、绝缘至导电、光性好、高脆性、低韧性
金属材料	金属键	延展性好、不透明、导热、导电
高分子材料	共价键和范德瓦耳斯键	重量轻、低强度、中韧性、易加工、热/电绝缘

按照材料与不同外界条件的表现行为不同,将材料的性能分为化学性能、物理性能和力学性能三个方面。

1. 化学性能

材料在使用过程中一定会或多或少同周围的环境发生一定程度上的气相/固相、液相/固相或固相/固相之间的反应,随着反应的进行,表面逐渐被侵蚀。因此,材料的化学性能是指材料抵抗各种介质作用的能力,包括溶蚀性、耐腐蚀性、抗渗入性、抗氧化性等,可归结为材料的化学稳定性。

材料的化学稳定性依材料的组成、结构等而不同。金属材料主要易被氧化腐蚀;硅酸盐类的材料由于氧化、溶蚀、冻结溶化、热应力、干湿等作用而被损坏;高分子材料则会因氧化、生物作用、虫蛀、溶蚀和受紫外线的照射老化降解而损害其耐久性。

2. 物理性能

材料的物理性能是当材料处在声、光、电、磁、热等能量场作用下时所表现出来的能力,如密度、熔点、导电性、导磁性、热膨胀性等,是材料本身固有的特性。