

非金属材料

FEI JINSHU CAILIAO

耿刚强
著

第 1 版

西安地图出版社

内 容 提 要

本书旨在阐述非金属材料化学组成、结构、性质（性能）、成型方法和应用的科学基础知识及其之间相互关系。并且重点介绍国内外用量最大、发展最快的非金属材料。全书共分九章，内容包括高分子材料、无机非金属材料 and 复合材料的基础知识、塑料、橡胶、胶粘剂、陶瓷、胶凝材料、复合材料。

本书可作为高等院校材料类、机械类及相关专业教材和参考书，亦可供有关科研技术人员参考。

前 言

材料是人类赖以生存和发展的物质基础。人类的生活、生产实践，对材料不断提出新的要求，新的材料出现又推动人类的生活、生产进一步发展。进入 21 世纪，新材料已成为最重要和最有发展潜力的三大支柱领域之一，本身也形成很大的高新技术产业。

近几十年随着大规模合成技术迅速发展，大量人工合成材料迅速进入工业领域；陶瓷从传统陶瓷发展到先进陶瓷；复合材料日益在各领域崭露头角，使原来以金属材料为一统的材料成为高分子材料、无机非金属材料 and 金属材料三足鼎立的“全材料”。因而非金属材料在今天的材料科学与工程中已成为不可缺少的重要组成部分。

非金属材料是按物质属性分类，泛指除金属材料外其它材料，其主要组成是由有机高分子材料和无机非金属材料构成。同时材料的复合化也是现代材料发展必然趋势，而复合材料的主要基础又是在高分子材料和陶瓷材料上。所以了解和掌握非金属材料已成为当代工程技术人员不可缺少的基础。

为了适应现代科技发展需要，国家教育部 1998 年调整了专业目录，拓宽了专业面。各高校相应对教学基本要求作了重大修改。对机械工程类专业的工程材料部分相应加强了非金属材料的基础和应用的基本要求。

本书是基于编者多年教学讲义，并参考国内外同类教材和资料编写而成。为了体现内容全面、系统性强，同时适应宽口径，少学时教学需要，本书在充分论述有机高分子材料和无机非金属材料基础知识和理论基础上，选择塑料、橡胶、粘结剂、陶瓷、胶凝材料和复合材料为主要内容，系统论述这些材料特性、功能并相应介绍了品种和工艺新发展。

相对金属材料来说，非金属材料发展历史短，其基础理论和工程技术等方面还很不成熟，目前还在迅速发展和完善。同时由于编者水平有限，本书难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 非金属材料在材料科学与工程体系中地位	1
第二节 非金属材料在工程材料中的分类	2
第三节 非金属材料在材料发展趋势中的作用	4
第二章 高分子材料基础	6
第一节 概述	6
一、高分子材料发展简介	6
二、高分子材料基本概念	7
三、高分子材料的合成	11
四、高分子材料分类与命名	15
五、高分子材料组成、特点和应用	20
第二节 高聚物的结构	22
一、大分子链的结构	23
二、大分子链的柔顺性	27
三、高聚物的聚集态结构	31
第三节 高聚物的物理状态	39
一、非晶态高聚物力学状态	40
二、晶态高聚物力学状态	45
三、体型高聚物力学状态	47
第四节 高聚物基本性能	48
一、力学性能	48
二、电性能	59
三、化学稳定性	61
四、老化现象及其预防	62
五、高聚物改性	65
第三章 塑料	72
第一节 塑料的组成	72

第二节 塑料的分类	75
第三节 塑料主要性能	76
一、塑料的主要性能特点	77
二、塑料的主要性能指标	78
第四节 塑料的成型加工	82
一、成型加工过程	82
二、成型加工工艺	83
三、混合与塑化	86
四、主要成型方法	88
第五节 主要塑料介绍	95
一、通用塑料	95
二、工程塑料	107
三、特种工程塑料	117
第六节 塑料的选用	124
一、选用原则	124
二、几类典型工程塑料零件的选材	126
第四章 橡胶	128
第一节 概述	128
第二节 橡胶的组成与分类	128
一、橡胶的分类	128
二、橡胶制品的分类	129
三、橡胶的组成	130
第三节 橡胶的主要性能	133
一、高弹性能	133
二、力学性能	134
三、耐磨性能	134
四、耐老化性能	135
五、粘弹性能	135
第四节 橡胶制品成型工艺	136
一、塑炼	136

二、混炼·····	136
三、压型·····	137
四、硫化·····	137
第五节 橡胶的老化及防止·····	139
一、影响橡胶老化的因素·····	139
二、橡胶老化的防止·····	141
第六节 常用橡胶材料·····	142
一、天然橡胶·····	142
二、通用合成橡胶·····	143
三、特种橡胶·····	147
第五章 胶粘剂·····	152
第一节 概述·····	152
第二节 胶粘剂的分类与组成·····	154
一、胶粘剂的分类·····	154
二、胶粘剂的组成·····	155
第三节 胶接机理·····	157
一、胶接的基本原理·····	157
二、胶接剂应具备的条件·····	159
三、胶接破坏的形式·····	161
第四节 胶接工艺·····	162
一、工件的表面处理·····	162
二、调制胶粘剂·····	166
三、涂敷胶粘剂·····	168
四、粘合·····	169
五、固化·····	169
六、质量检查·····	170
七、胶接在机械工程的应用·····	170
第五节 常用胶粘剂·····	172
第六章 无机非金属材料基础知识·····	173
第一节 无机非金属材料定义和特点·····	173

第二节 无机非金属材料的结构·····	175
一、无机非金属材料原子级结构·····	175
二、晶体结构·····	176
三、非晶体结构·····	187
四、多相结构·····	188
五、孔结构·····	188
第三节 无机非金属材料的力学性能·····	190
一、弹性·····	190
二、脆性·····	190
三、塑性·····	191
四、韧性·····	193
五、力学强度·····	194
六、高温力学行为·····	202
第四节 无机非金属材料的热性能·····	211
一、比热容·····	211
二、热膨胀·····	211
三、热传递·····	213
第五节 传质·····	217
一、扩散·····	217
二、渗透·····	220
三、透气·····	221
第六节 电磁性能·····	222
一、电性能·····	222
二、磁性能·····	224
第七章 陶瓷·····	227
第一节 陶瓷的定义和分类·····	227
第二节 陶瓷制作原理·····	228
一、原料的制备·····	229
二、成型·····	232
三、坯体干燥·····	234

四、陶瓷的烧成	236
五、施釉	243
第三节 陶瓷的组织结构	254
一、晶体相	254
二、玻璃相	254
三、气相	256
第四节 陶瓷的性能特点	257
一、陶瓷的机械性能	257
二、陶瓷的物理和化学性能	262
第五节 普通陶瓷	263
一、陶器	264
二、炻器	269
三、瓷器	270
第六节 特种陶瓷	276
一、氧化物陶瓷	276
二、非氧化物陶瓷	289
第八章 胶凝材料	303
第一节 胶凝材料的定义与分类	303
第二节 胶凝材料制作原理	303
一、石灰	303
二、石膏	304
三、硅酸盐水泥	305
第三节 胶凝材料的水化硬化	306
一、石化的水化硬化	306
二、石膏的水化硬化	307
三、水泥的水化硬化	307
第四节 胶凝材料的性能	309
一、石灰的技术性能	309
二、石膏的主要性能	309
三、水泥的主要性能	309

第五节 通用水泥	310
第九章 复合材料	314
第一节 复合材料的概念及发展	314
第二节 复合材料的定义及分类	316
第三节 复合材料特性	318
一、比强度比模量	318
二、抗疲劳性能	319
三、减振能力强	319
四、高温性能	320
五、断裂安全性	321
第四节 复合材料的增强机制及复合原则	321
一、复合材料的增强机制	322
二、纤维复合材料的复合原则	323
三、复合材料的力学性能混合规律	326
第五节 增强材料	328
一、概述	328
二、玻璃纤维	328
三、碳纤维	330
四、高强有机纤维	331
五、陶瓷纤维	334
第六节 复合材料的界面	335
第七节 主要复合材料及其典型品种	337
一、聚合物基复合材料	337
二、金属基复合材料	343
三、无机非金属基复合材料	349
附录表 1	355
附录表 2	359

第一章 绪 论

第一节 非金属材料在材料科学与工程体系中地位

凡是用来制造器件、构件和其它可供使用的物质统称为“材料”。随着人类生活、生产实践的不断发展,对材料也就不断提出新要求。许多新材料的出现,又推动人类进一步发展。由于人类科学技术进步总是与新材料出现和使用密切相关,所以人类历史分期也就常用材料来表征其文明进步程度,如“石器时代”、“铜器时代”、“铁器时代”。如今,有人认为自 20 世纪中叶以来,人类开始进入有机和无机非金属材料时代。

人类在使用材料过程中不断认识材料,了解其性能变化。我国“周礼考工记”的“金之六齐”叙述,即是合金成分与使用性能关系的最早文献记载。17 世纪英国学者虎克总结的材料应力与应变关系的弹性定律,奠定了材料性能规律是工程材料应用的基础。到 20 世纪前半叶,工程材料的应用均是基于应力应变为代表的宏观材料现象,尚未联系到同时代物理学已深入研究的微观结构中。20 世纪 50 年代固体物理学发展与冶金学结合,形成当今的“材料科学”,到 70 年代又发展成“材料科学与工程”(MSE),成为基础科学和工程设计的桥梁。

材料科学与工程(MSE)包含四个要素:材料的合成与制备、成分组织结构、材料特性和使用性能。四要素之间相互依赖、相互制约、相辅相成,不可分割。

工程材料是指用于工程上各种设备、构件、产品的材料,是材料科学与工程中实际应用的材料。工程材料领域目前包括金属材料和非金属材料两大部分。

20 世纪 40 年代以前工程材料全部是金属材料。经过半个多

世纪发展，非金属材料已发展出近百万种，占据工程材料的“半壁江山”。以塑料为言，到 2000 年产量达到 3.5 亿吨，是钢铁产量体积的 44 倍。陶瓷材料从传统应用范围实质性突破成为高温结构材料和特殊功能材料来源。复合材料从 1932 年玻璃钢问世开始，到 20 世纪 70 年代，世界各种玻璃钢年产量超过百万吨。碳纤维、硼纤维、晶须等高性能增强纤维与金属、陶瓷等基体的新型复合材料研究和应用也越来越深入广泛。

目前，材料科学与工程正处于新的变革阶段，新材料如：非晶态（亚稳态）材料、低维材料（如光导纤维、金刚石薄膜等），纳米材料、复合材料、智能材料、功能材料（高温超导、磁材料、光电转换材料、梯度材料等）日新月异，层出不穷，天然材料使用比重大幅度下降，而合成和新材料品种日益增多。

第二节 非金属材料在工程材料中的分类

工程材料按物性分类如表 1-1，按用途分类如表 1-2。

表 1-1 工程材料物性分类表

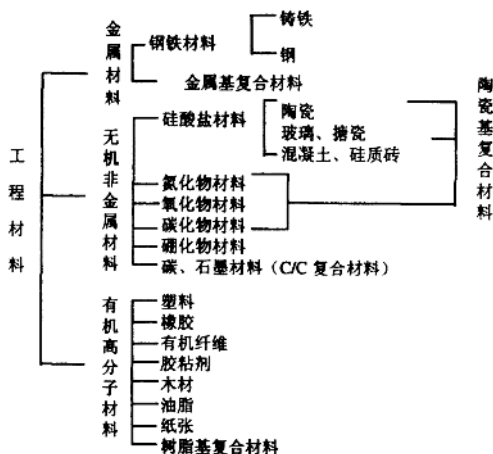
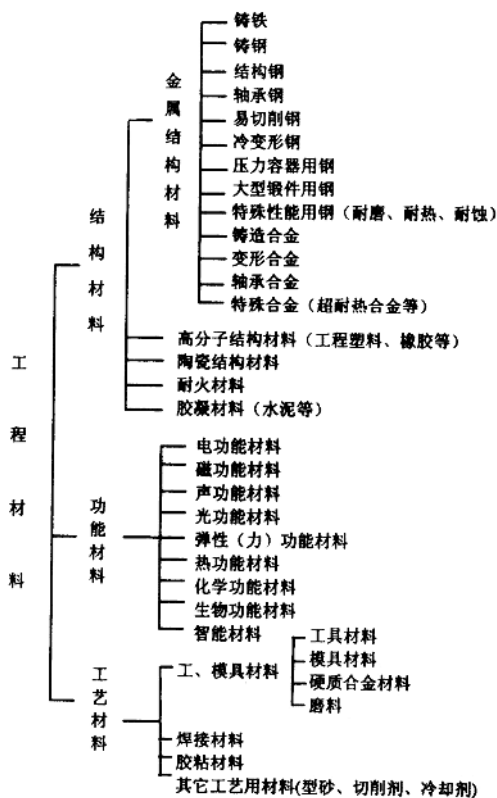


表 1-2

工程材料用途分类表



第三节 非金属材料在材料发展趋势中的作用

当前工程材料已扩展成为金属材料、有机高分子材料（聚合物）和无机非金属材料（陶瓷类在内）三大系列全材料范围。

随着全球第三次工业革命迅速发展，材料科学与工程发展尤为迅猛。其发展趋势是结构材料复合化，低维材料扩大应用化，功能材料迅速化，新型材料实用化，以及材料设计选用计算机化。在这些发展趋势中，非金属材料起到关键和重要作用。

结构材料复合化是由于工业发展要求结构材料向更高强度及更苛刻介质、极限工作环境中工作发展。尽管金属材料通过综合强化和晶界净化，高分子材料通过聚合和分子重排等手段改善其强度性能潜力还很大，陶瓷材料通过纳米及结构突破陶瓷脆性问题，但单纯用单一材料往往存在难以克服缺点，如金属材料耐热、耐蚀和耐磨性能低，高分子材料弹性模量偏低，比强度不足，陶瓷材料脆性大等等，所以用不同材料复合化将得到优于原组成材料性能的新材料，这已成为当前结构材料发展趋势。第一代复合材料是玻璃纤维增强树脂基复合材料（即玻璃钢），第二代是碳纤维增强树脂基复合材料，第三代是正在发展的金属基、陶瓷基和碳基等复合材料。

低维材料包括零维（超微粒——亚微米和纳米级）一维（纤维）和二维（薄膜）材料，可用于结构材料和功能材料，是近年发展最快一类材料。零维材料中纳米金属和纳米陶瓷粉末是材料界关注热点，对未来材料和工业革命起到不可估量作用。

一维材料中最突出是光导纤维，它是现代信息革命的基础。

二维材料随着电子器件小型化，需要各类薄膜态绝缘，半导体、介电及磁性材料。金刚石薄膜和有机高分子膜十分诱人，高温超导膜尤为突出。

功能材料目前是新材料发展的重点。从高温超导材料发展

看，因氧化物高温超导体问世以来，临界温度一再被突破。虽然无机非金属材料固有脆性及其超导稳定性有待改善，但对超导材料的应用已日趋深入和广泛。如美、日科学家已将高温超导体制成长达 1000m 的线材，可应用于输电导线、电力储存装置、超导磁体、电动机以及磁悬浮列车等方面。近年发展迅速的梯度材料从原子水平上把无机陶瓷材料与金属材料混合而构成，其界面组分、结构和性能呈梯度变化，具有广泛应用潜力。

至今，如航空航天器和燃气轮机这类高性能参数机械产品仍受到材料极限限制。常规的材料（如钛合金和超合金）使用温度已达极限，而新型材料的性能飞跃和突破将成为这些高参数机械产品性能突破物质基础。如图 1-1 所示：

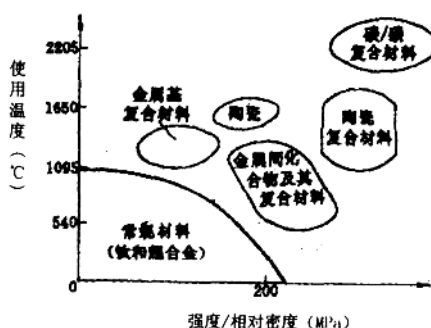


图 1-1 各类材料温度—强度范围

第二章 高分子材料基础

第一节 概 述

一、高分子材料发展简介

高分子材料是一种古老而年轻的材料。说它古老是指从使用年代而言，由于天然高分子材料在自然界广泛存在，如橡胶、皮毛、蚕丝、棉花、木材、多糖（淀粉、纤维素）等，人类从远古时期就学会使用，至今仍然是人类衣食住行须臾不离的基本材料。说它年轻是指从科学和工程意义上人工合成高分子材料出现不过一个半世纪。

从远古到 19 世纪，人类虽然不断利用天然高分子材料，但对其本质不甚了解。直到 1826 年 M.Faraday 发现天然橡胶组成是 C_5H_8 ，1939 年 E.Simon 成功实现苯乙烯聚合和 C.Goodyear 发现橡胶的硫化，人类才对高分子材料从本质上发生认识飞跃，随后是半合成高分子材料的赛璐璐的发明和酚醛的合成。在 1920 年 H.Standinger 提出高分子概念，并开展大量实验证实，为此他于 1953 年获诺贝尔奖。1929 年 Corothern 开始高分子合成体系研究，从而在 20 世纪 30 年代形成多种乙烯基聚合物工业化。1936 年 kuhn 创立橡胶弹性理论，Fdory 创立高分子合成的加聚和缩聚理论和高分子溶液理论，从而使 Dupont 公司和 ICI 公司工业化产品的氯丁橡胶、低密度聚乙烯（LDPE）和尼龙-66 诞生。1944 年 Mayo 创立自由基共聚合理论，1948 年 Smith 创立乳液聚合理论，又使聚合物共聚合成的品种 PET 和 ABS 出现。20 世纪 50 年代 ziegler 和 Natha 开始研究应用有机金属催化剂合成出高密度聚乙烯（HDPE）和等规聚丙烯（PP）等。从 20 世纪 80 年代开始研究茂金属催化剂合成 PE，形成高分子合金的发展。现在人

类在改进新品种、具有可设计性或综合性能更为优秀的聚合物，废弃高分子材料回收利用等方面迅速发展。

中国的高分子材料发展是“起步晚（1958 年才有 3000 吨的聚氯乙烯树脂生产线），发展快（目前，塑料产品数量位居世界第二，仅次于美国），差距大（中国人的塑料占有量仅 10kg，而世界平均为 27kg），竞争力弱（以仿制、引进为主，自主开发较少），前景好”。

二、高分子材料基本概念

1. 高分子化合物

高分子材料是以高分子化合物为主要组分材料。高分子化合物是指相对分子量大于 1000 的物质。它的分子量多在 5000 到 1 000 000 之间，普通无机物或有机物分子量通常低于 500，称之为低分子化合物。如表 2-1 所示一些物质分子量。

表 2-1 一些物质分子量

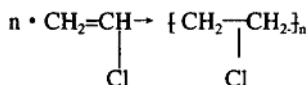
化 合 物			分 子 量
低分子	无机	铁	55.8
		水	18
		石英	60
	有机	甲烷	16
		苯	78
		三硬脂酸甘油酯	890
高分子	天然	天然纤维素	~570 000
		丝蛋白	~150 000
		天然橡胶	200 000~500 000
	合成	聚氯乙烯	12 000~160 000
		聚甲基丙烯酸甲酯(有机玻璃)	50 000~140 000
		尼龙 66	20 000~25 000

2. 单体

高分子化合物虽然分子量大，但化学组成一般比较简单，通常由 C、H、O、S、N 等元素构成，其中主要是碳氢化合物及其

衍生物。通过合成方法，将一种或几种简单低分子化合物聚合而成高分子化合物。

例如聚氯乙烯就是由低分子化合物氯乙烯聚合而成，其化学反应式可写成：

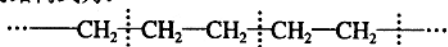


从化学反应式中可看出，氯乙烯小分子打开双键连接成结构相同的单元多次重复组成的大分子链。这种可以聚合成高分子化合物的低分子化合物称为单体。组成聚氯乙烯的单体是氯乙烯（ $\text{CH}_2=\text{CHCl}$ ）。丁苯橡胶单体为丁烯（ $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$ ）和苯乙烯（ $\text{C}_6\text{H}_5-\text{CH}=\text{CH}_2$ ）。ABS 塑料的单体为丙烯腈（ $\text{CH}_2=\text{CHCN}$ ）、丁二烯和苯乙烯。所以，单体也是高分子化合物的合成原料。

3. 链节

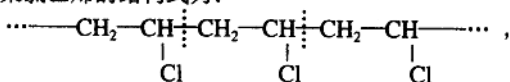
组成高分子化合物相同结构单元称为链节。

高分子化合物的分子很大，主要呈长链形，因此常称大分子链或分子链。大分子链极长，长度可达几千埃（ $\text{\AA}$ ）以上，而截面一般只有几埃，是由许许多多结构相同的基本单元重复连接构成的。组成大分子链的这种特定结构单元叫做链节。例如，聚乙烯大分子链的结构式为：



可以简写为 $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ 。它是由许多 $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ 结构单元重复连接构成的。这个结构单元就是聚乙烯的链节。

同样，聚氯乙烯的结构式为：



可简写为 $\left\{ \underset{\text{Cl}}{\underset{|}{\text{CH}_2}}-\underset{\text{Cl}}{\underset{|}{\text{CH}}} \right\}_n$ 。 $-\text{CH}_2-\underset{\text{Cl}}{\underset{|}{\text{CH}}}-$ 即为聚氯乙烯的链节。