

内 容 提 要

本书第一章简单介绍工程材料的分类、基本性质及发展前景；第二、三、四章分别介绍了高分子聚合物材料、陶瓷材料、复合材料的结构、工艺过程、性能（主要是力学性能）、应用及其之间的关系。

本书可作为金属材料及热处理专业及机械动力类有关专业高年级学生和研究生教材和教学参考书，也可作为工程技术人员知识更新的参考书。

非 金 属 工 程 材 料

周敬恩 金志浩 编

责任编辑 杨 玲

西安交通大学出版社出版

（西安市咸宁路28号）

西安双桥头印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/32 印张 9 字数 188 千字

1987年6月第1版 1987年10月第1次印刷

印数：1—3500册

ISBN 7-5605-0022-6/TB-1. 定价：1.50元

书号：15340·133

前 言

材料、能源和信息已成为新技术革命的三大支柱。而材料又是后两者赖以发展的基础。材料种类繁多,按照用途分为结构材料和功能材料两大类,前者是指靠力学性能得以发展的材料,后者是指利用物质的声、光、电、磁等各种物理性能得以发展的材料;按照材料的特性,可以将其分为金属材料、无机非金属材料 and 有机高分子材料(聚合物材料)三大类,而这三类材料又可以通过不同的方式构成各种复合材料。

冶金学以金属材料为研究对象,而近二三十年中在化学、物理化学、力学和固体物理学等基础学科基础上发展起来的材料科学是以所有材料为研究对象,研究材料的成分、结构、显微组织同其性能及应用之间的相互关系,强调微观结构与宏观表现的关系这一材料的共性。

高等工科院校机械类、动力类有关专业以及金属材料及热处理专业传统的教学内容主要涉及金属材料,学生对非金属材料的知识了解甚少,目前已不能适应科学技术飞速发展的要求。因此,近年来许多院校已相继开设和准备开设“材料科学导论”、“工程材料”等课程,本书正是为满足这一新的教学需要而编写的。考虑到有关金属材料的教科书和教学参考书较多,机械动力类有关专业以及金属材料及热处理专业学生毕业后主要接触结构材料,因此本书只限于非金属材料,主要介绍工程塑料、工程陶瓷和复合材料的

结构特点、性能和应用的基本知识，重点介绍这些材料与金属材料在结构和性能方面的异同及材料结构和工程性能的关系。

全书共分四章。第一、二、四章由周敬恩执笔，第三章由金志浩执笔。本书经西安交通大学材料工程系王笑天教授和天津大学应用化学系曹同玉副教授审阅，编者表示感谢。

编 者

1986年12月

目 录

第 1 章 工程材料及其展望	1
1.1 工程材料及其分类	1
1.1.1 金属材料	2
1.1.2 工程塑料	3
1.1.3 工程陶瓷	4
1.2 有机高分子材料及其基本性质	5
1.3 无机非金属材料及其基本性质	15
1.4 工程材料展望和复合材料	17
复习题	22
主要参考文献	22
第 2 章 高分子聚合物材料	24
2.1 高分子聚合物的结构	25
2.1.1 聚合物分子	25
2.1.2 聚合物的结合键	28
2.1.3 聚合物分子链的类型和排列	29
2.1.4 聚合物的分子量和分子量分布	30
2.1.5 聚合物分子链结构的成分	32
2.1.6 聚合物分子的支化和交联	33
2.1.7 聚合物分子的构型	35
2.1.8 聚合物分子的构象	37
2.1.9 聚合物的聚集态结构	39

2.2 聚合物的合成	42
2.2.1 逐步聚合反应	42
2.2.2 加成聚合反应	44
2.3 提高聚合物结构性能的途径	47
2.4 聚合物的力学性能	48
2.4.1 聚合物的玻璃化转变和力学性能特点	50
2.4.2 聚合物材料的变形	51
2.4.3 聚合物的压缩应力-应变曲线	58
2.4.4 聚合物的屈服判据	60
2.4.5 流变学	63
2.4.6 聚合物的粘弹性	64
2.4.7 聚合物的高弹性(橡胶弹性)	71
2.4.8 聚合物的断裂	72
2.4.9 影响聚合物力学性能的因素	74
2.5 塑料的成型加工	89
2.5.1 注射成型的原理与过程	90
2.5.2 挤压成型的原理与过程	92
2.6 工程塑料的选择和应用	93
2.6.1 聚合物材料的选择	93
2.6.2 工程塑料的应用	100
复习题	103
主要参考文献	104
✓ 第3章 工程陶瓷	106
3.1 导 言	106
3.1.1 古老而又新型的陶瓷材料	106
3.1.2 陶瓷材料的特性与发展前景	107

3.2 陶瓷材料的物质结构和显微结构	111
3.2.1 陶瓷材料的结合键	111
3.2.2 晶体相	115
3.2.3 玻璃相	123
3.2.4 气相	126
3.3 陶瓷工艺过程	127
3.3.1 传统陶瓷的工艺过程	127
3.3.2 新型陶瓷的工艺过程	141
3.4 陶瓷材料的力学性能	152
3.4.1 陶瓷材料的弹性变形及抗力指标	152
3.4.2 陶瓷材料的塑性变形及抗力指标	155
3.4.3 陶瓷材料的断裂	162
3.4.4 陶瓷材料的疲劳	171
3.4.5 陶瓷材料的合理使用与联合强度理论	176
3.5 陶瓷材料的应用	181
3.5.1 发动机用高温高强度陶瓷材料	181
3.5.2 超硬工模具陶瓷材料	186
3.5.3 各种能源开发用高温陶瓷材料	191
3.5.4 特殊冶金用和电炉用耐火、耐热 陶瓷材料	196
3.5.5 耐热冲击陶瓷材料(低膨胀 复合氧化物)	197
3.5.6 化工陶瓷材料	197
复习题	199
主要参考文献	200
第4章 复合材料	202

4.1	概述	202
4.1.1	复合材料的分类和定义	202
4.1.2	复合材料的特点	204
4.1.3	复合材料的制造和在结构上的应用	205
4.2	复合材料的增强纤维	214
4.2.1	碳纤维	215
4.2.2	玻璃纤维	231
4.2.3	有机纤维 (Kevlar 纤维, 芳纶)	237
4.2.4	硼纤维和 sic 纤维	238
4.2.5	增强纤维的比较	241
4.3	聚合物基复合材料的基体材料	244
4.3.1	热固性树脂	245
4.3.2	热塑性树脂	250
4.4	纤维增强复合材料的力学性能	252
4.4.1	连续纤维增强单向板的强化原理及性能	253
4.4.2	非连续单向短纤维增强复合材料的强度	271
4.4.3	正交板的基本力学性能	274
	复习题	276
	主要参考文献	277

第 1 章 工程材料及其展望

1.1 工程材料及其分类

材料种类繁多，大体可以分为四类。第一类是作为能源用的材料。第二类是作为化学制品用的材料。这两类都以消耗材料本身为代价完成它们的功能，前者向人类提供能量，后者则通过化学效应对其他系统发生影响。第三类材料是产品赖以存在的基础，如压电传感器中的压电陶瓷和压电高分子材料，半导体器件中的Si和Ge等。这类材料的特点是只有极少数的材料才能完成与其相同的功能，即它不易被替代，通常没有该材料也就没有相应的产品。第四类材料在产品中起的作用与第三类相比其作用是第二位的，它们在使用中传递和承受外载荷或经受环境介质的侵蚀。人类对这类材料的使用和研制有着悠久的历史。对于这类材料，新材料的研制成功往往能改进产品质量或降低产品成本，材料的替代相对容易进行。

工程材料主要指第三类和第四类，前者称为功能材料，是依靠物质的声、光、电、磁等物理性能而得以发展并制造产品的材料；后者称为结构材料，它们能被用来制造承载构件长期使用，是依靠其力学性能而得以发展的材料。工程材料包括金属材料、工程塑料、工程陶瓷及它们的复合材料四类。工程塑料属于有机高分子聚合物材料，工程陶瓷属于无

机非金属材料。工程材料的分类见图 1-1。图中虚线表示只有部分纤维、橡胶、通用塑料和传统陶瓷作为工程材料使用。

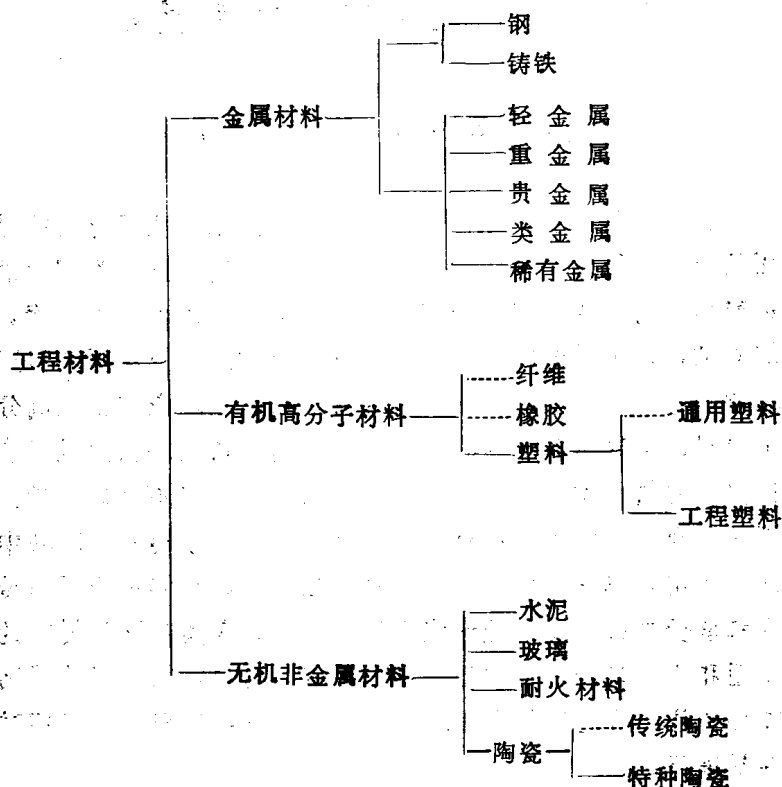


图 1-1 工程材料分类

1.1.1 金属材料

固体金属的结合键为金属键，常规方法生产的金属为晶体。金属有金属光泽，是热和电的良导体，具有高强度、高塑性和韧性等优良的综合机械性能和良好的可加工性，另外，金属还可以通过加入合金元素及热处理的方法改变其性能。这些

特性使金属成为最重要并且用得最为广泛的一类工程材料。

金属材料通常分为黑色金属材料和有色金属材料（非铁材料）两类。黑色金属材料包括钢和铸铁。钢按照化学成分分为碳素钢和合金钢；按照品质分为普通钢、优质钢和高级优质钢；按照冶炼方法分为平炉钢、转炉钢、电炉钢及沸腾钢、镇静钢和半镇静钢；按照金相组织分为珠光体钢、贝氏体钢、马氏体钢和奥氏体钢；按照用途分为建筑及工程用钢、结构钢、工具钢、特殊性能钢及专业用钢。铸铁通常分为灰铸铁、可锻铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁和特殊性能铸铁等。钢铁是现代工业中的主要金属材料，在机械产品中占整个用材消耗的60%以上。有色金属材料是指除Fe以外的其他金属及其合金。这些金属约有八十余种，分为轻金属（比重小于4.5）、重金属（比重大于4.5）、贵金属、类金属和稀有金属五类。工程上最重要的有色金属是Al、Cu、Zn、Sn、Pb、Mg、Ni、Ti及其合金。有色金属材料的消耗虽然只占金属材料总消耗的5%，但是因为它们具有优良的导电导热性同时比重小、化学性质稳定、耐热耐腐蚀，因而使得它们在工程上占有重要地位。

1.1.2 工程塑料

塑料是以合成树脂为主要成分的有机高分子材料，在适当的温度及压力下，能塑造成各种形状的制品。除树脂外，塑料还含有增塑剂、填料、增强材料、防老化剂及固化剂等各种添加剂。从使用的角度，塑料分为通用塑料和工程塑料。通用塑料是指产量大、用途广、价格低的一类塑料，主要包括六大品种：聚乙烯、聚氯乙烯、聚苯乙烯、聚丙烯、酚醛塑料和氨基塑料。工程塑料一般是指具有高强度、高

模量并能在较高温度下长期使用的塑料，如拉伸强度大于49MPa，拉伸和弯曲模量超过2GPa，并能在一定载荷作用下于100℃以上长期使用的塑料。常见的工程塑料有耐冲击的ABS(丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚体)、聚酰胺、缩醛、聚碳酸酯、聚砒、聚苯硫醚、聚酰亚胺和氟塑料等。常见的工程塑料及其主要性能见表1-1。

根据树脂在加热和冷却时所表现的性质，塑料可分为热塑性塑料和热固性塑料。热塑性塑料受热软化，在外力作用下可塑造成形，而冷却时会变硬；再受热又可软化，冷却时再变硬，可重复使用多次。聚乙烯、聚丙烯、聚酰胺、ABS树脂均属于热塑性塑料。热固性塑料受热软化并塑造成形后，经过一段时间固化变成坚硬制品，再受热不会软化和熔融，温度过高则发生分解。常见的酚醛塑料和环氧树脂均属于热固性塑料。

1.1.3 工程陶瓷

陶瓷分为传统陶瓷和特种陶瓷。传统陶瓷以天然硅酸盐矿物为原料，经粉碎、成型和烧结制成，主要用做日用陶瓷、建筑陶瓷和卫生陶瓷（部分传统陶瓷也作为工程陶瓷使用），要求烧结后不变形、外观美，但对强度要求不高。特种陶瓷是以人工化合物（氧化物、氮化物、碳化物、硼化物等）为原料制成的，主要用于化工机械、动力、电子、能源和某些新技术领域。工程陶瓷主要指的是特种陶瓷。对这类陶瓷制品，除要求具有一定外形外，还要求具有耐高温、耐磨损、耐腐蚀、高强度等物理性能和机械性能。目前，最重要的特种陶瓷有 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 Si_3N_4 、 SiC 和 BN ，它们的主要性能和用途见表1-2。

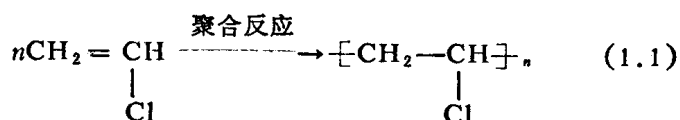
与金属材料比较，工程塑料比重小，比强度高，有优良的化学稳定性，摩擦系数小，耐磨损，绝缘性能好，并且有消音、吸震、透明等各种特性，此外，塑料成型简便，生产效率高；然而工程塑料有老化现象，在日光、大气和外力作用下，机械物理性能会逐渐下降，不耐高温、易燃，机械强度绝对值较低，刚性差。

工程陶瓷抗氧化，耐腐蚀、耐磨损、高温抗蠕变性能好，但脆性大、韧性差。

1.2 有机高分子材料及其基本性质

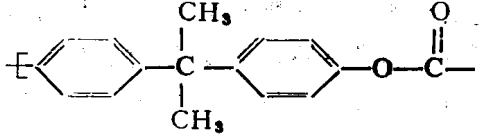
分子量大于10,000的以C、H元素为基础的化合物称为有机高分子材料。人类最早使用的高分子材料是一些天然物质，如纤维素、橡胶、树脂等。今天，人们不仅能用人工合成的方法制造出与这些天然物质相媲美的材料，而且还能制造出自然界不存在的具有特殊性能的合成材料。

常用的有机高分子材料，分子量一般在数十万以上，含有的原子数通常大于 10^3 。然而尽管它们的分子量如此之大，但这些大分子不过是由许多相同的简单结构单元按一定方式重复连接的集合体而已。例如，聚氯乙烯是由许多氯乙烯结构单元重复连接而成，如下式所示：



反应式中， $-\text{CH}_2-\underset{\text{Cl}}{\underset{|}{\text{CH}}}-$ 是聚氯乙烯的基本单位，称做结

表 1-1 典型工程塑料的

名 称 (代号)	结 构 式	比 重
丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚体 (ABS)	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH} \\ \\ \text{CN} \end{array} \right]_x \left[\text{CH}_2 - \text{CH} = \text{CH} - \text{CH}_2 \right]_y \left[\text{CH}_2 - \text{CH} \right]_z$ 	1.02— 1.08
聚酰胺 (尼龙)	$\left[\text{NH}(\text{CH}_2)_{n-1}\text{CO} \right]_x$ 尼龙 n $\left[\text{NH}(\text{CH}_2)_m - \text{NHCO} - (\text{CH}_2)_n - \text{CO} \right]_x$ 尼龙 mn	1.13— 1.15 1.14— 1.15
聚碳酸酯 (PC)	 $\left[\text{O} - \text{C}(\text{O}) - \text{O} - \text{C}(\text{CH}_3)_2 - \text{C}_6\text{H}_4 \right]_x$	1.2
聚 甲 醛 (FOM)	$\text{CH}_3 - \text{C}(=\text{O}) - \text{O} - \left[\text{CH}_2\text{O} \right]_n - \text{C}(=\text{O}) - \text{CH}_3$	1.43

主要性能和特点*

抗拉强度 MPa	抗弯强度 MPa	弹性模量 GPa	缺口冲击强度 J/Cm²	特 点
34.3—61.8	60.8—95.1	1.8—2.8	0.6—5.2	较好的综合性能，耐冲击，尺寸稳定性较好；可用玻璃纤维增强
53—76.5	68.6—98.1	0.8—2.5	0.3	坚韧，耐磨，耐疲劳，耐油，耐水，抗霉菌，无毒，吸水性大；可用玻璃纤维增强
55.9—81.4	98.1—108.9	1.4—3.2	0.38	
58.8—68.6	103.9	2.2—2.5	6.3—7.4	良好的机械性能，突出的冲击强度和韧性，尺寸稳定性好，无色透明，着色性好，吸水性小，耐热性好，不耐碱、酮、胺、芳香烃，有应力开裂倾向；可用玻璃纤维增强
58.8	96.1	2.8	0.75	良好的综合性能，强度、刚性、冲击、疲劳、蠕变等性能指标均较高，耐磨性好，吸水性小，尺寸稳定性好；可用玻璃纤维增强

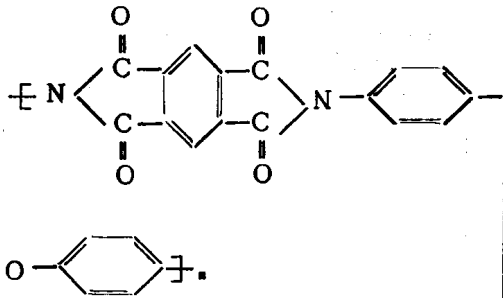
续表

名 称 (代号)	结 构 式	比 重
聚对苯二甲酸 乙二醇酯 (PET)	$\text{HO}-\left[\text{C}_2\text{H}_4-\text{O}-\text{C}(=\text{O})-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(=\text{O}) \right]_n$ $\text{C}_2\text{H}_4-\text{OH}$	1.37— 1.38
聚砜(PSF)	$\left[\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{SO}_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O} \right]_n$	1.24
聚苯醚 (PPO)	$\left[\text{C}_6\text{H}_3(\text{CH}_3)_2-\text{O} \right]_n$	1.06

1-1

抗拉强度 MPa	抗弯强度 MPa	弹性模量 GPa	缺口冲击强度 J/Cm ²	特 点
78.4	109.8	2.8	0.39	良好的减摩耐磨性能,机械性能与聚甲醛、尼龙相似,电绝缘性良好,但强度与冲击性能随温度上升急剧下降,不耐碱;可用玻璃纤维增强
84	105.9— 124.5	2.4—2.7	0.69— 0.79	优良的耐热、耐寒、抗蠕变及尺寸稳定性,耐酸、碱及高温蒸气
65.2	87.3— 129.4	2.6—2.8	0.81— 1.0	良好的综合性能,拉伸、刚性、冲击、抗蠕变性能指标均较高,可在120°C蒸汽中使用,电绝缘性好,受温度及频率影响小,吸水性小

续表

名 称 (代号)	结 构 式	比 重
聚四氟乙烯 (F-4)	$[-CH_2-CF_2-]_n$	2.11— 2.19
聚酰亚胺 (PI)	 The structure shows a repeating unit of a polyimide. It consists of a central benzophenone moiety (two carbonyl groups connected by a benzene ring) where the imide nitrogens are part of the polymer backbone. One nitrogen is connected to a p-phenylene ring, which then connects to the next repeating unit. The other nitrogen is part of the imide ring structure. Below the main structure, there is a p-phenylene ring with a terminal oxygen atom, likely representing a different part of the polymer or a related structure.	1.4—1.6
聚苯硫醚 (PPS)	$[-C_6H_4-S-]_n$	1.3—1.8

* 表中数据引自文献[5]和文献[9]