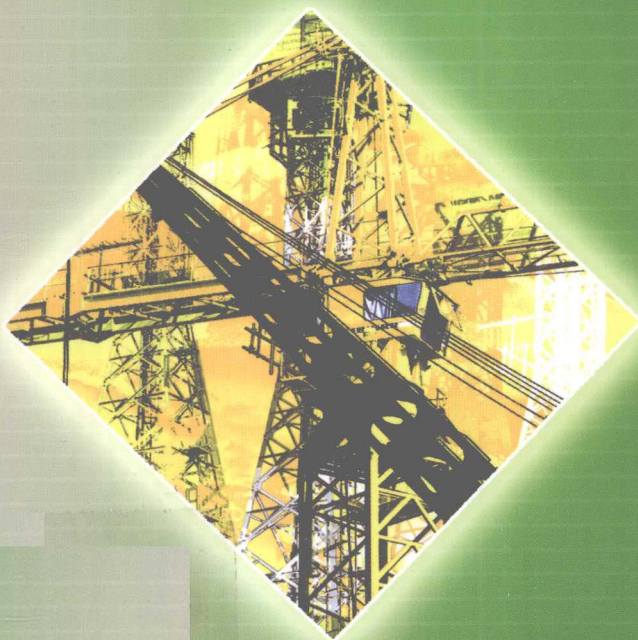




全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

工程材料 与成形工艺基础

主 编 王 宏 刘贯军
副主编 曹玉宝 周建强



高等教育出版社

全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

工程材料与成形工艺基础

Gongcheng Cailiao yu Chengxing Gongyi Jichu

主 编 王 宏 刘贯军

副主编 曹玉宝 周建强



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书是根据教育部新制定的“工程材料及机械制造基础课程教学要求”编写而成的。

本书包括工程材料和热加工工艺基础等内容,注重内容的精选和更新,强调知识性、实用性、先进性和创新性。全书内容包括绪论、材料分类及性能、金属与合金的结构与结晶、铁碳合金与铁碳相图、金属的热处理、合金钢、铸钢与铸铁、有色金属与粉末冶金材料、非金属材料、铸造、金属压力加工、焊接、机械零件的选材等12章。

本书可作为高等工科院校机械、材料、管理等各类专业的教材,也可作为各类成人教育教材及相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料与成形工艺基础/王宏,刘贯军主编. —北京:高等教育出版社,2010.5

ISBN 978-7-04-029170-4

I. ①工… II. ①王… ②刘… III. ①工程材料-成形-工艺-高等学校-教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 043031 号

策划编辑 宋 晓 责任编辑 李文婷 封面设计 于 涛
版式设计 余 杨 责任校对 胡晓琪 责任印制 毛斯璐

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街4号	咨询电话	400-810-0598
邮政编码	100120	网 址	http://www.hep.edu.cn http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com http://www.landaco.com.cn
印 刷	北京机工印刷厂	畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×960 1/16	版 次	2010年5月第1版
印 张	25.5	印 次	2010年5月第1次印刷
字 数	480 000	定 价	34.50 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 29170-00

前 言

本书是根据教育部新制定的“工程材料及机械制造基础课程教学要求”,在总结高等工科院校机械类专业人才培养模式的教改经验基础上编写而成的。

本书将工程材料和热加工工艺基础融合为一体,避免了内容重复的现象,其主要特点如下:

1. 在教学内容的组织安排上,将工程材料与热加工工艺基础有机地整合,力求简明、重点突出,合理处理系统性与实用性、先进性与针对性之间的关系,既注重体系的完整性,又兼顾内容的衔接性。

2. 注重内容的精选和更新,增加了大量新材料、新工艺知识的介绍,以开阔学生的视野,适应时代发展的要求。

3. 将材料的性能、结构、凝固、变形、热处理和热加工等融为一体,并增加了机械零件的选材和工艺路线分析,使学生对零件的选材和工艺路线的制订有较全面的认识和掌握。

4. 书中的名词、术语、牌号等均采用最新的国家标准,使用了法定计量单位。

本书共12章。参加编写的有潍坊学院王宏(绪论、第4章),河南科技学院刘贯军(第1、5、11章),潍坊学院曹玉宝(第9、10章),青岛农业大学周建强(第2章)、刘玉高(第3章),河南科技学院马利杰(第7、8章)、王占奎(第6、12章)。全书由王宏、刘贯军任主编,曹玉宝、周建强任副主编。

山东大学齐宝森教授认真审阅了本书,在此表示感谢。

由于编者水平有限,书中错误与不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2008年12月

目 录

绪论	1
第 1 章 材料分类及性能	3
1.1 材料的分类	3
1.1.1 金属材料	4
1.1.2 陶瓷材料	4
1.1.3 高分子材料	5
1.1.4 复合材料	5
1.2 材料的性能	6
1.2.1 力学性能	6
1.2.2 物理和化学性能	14
1.2.3 工艺性能	16
复习思考题	17
第 2 章 金属与合金的结构与结晶	18
2.1 金属的晶体结构与结晶	18
2.1.1 金属的晶体结构	18
2.1.2 实际金属晶体中的晶体缺陷	21
2.1.3 纯金属的结晶	24
2.2 合金的晶体结构与结晶	29
2.2.1 固态合金的相结构	29
2.2.2 二元合金相图	32
2.2.3 相图与合金性能的关系	44
复习思考题	45
第 3 章 铁碳合金与铁碳相图	47
3.1 铁碳合金的组织结构	47
3.1.1 铁碳合金的组元	47
3.1.2 铁碳合金的相结构	48
3.1.3 铁碳合金的组织	49
3.2 铁碳合金相图	49
3.2.1 Fe-Fe ₃ C 相图分析	49
3.2.2 典型合金平衡结晶过程及组织	52
3.2.3 铁碳合金相图的应用	60

3.3 碳素钢	63
3.3.1 常存杂质元素对碳素钢性能的影响	63
3.3.2 常用碳素钢的分类	63
3.3.3 碳素钢的牌号、性能及用途	64
复习思考题	65
第4章 金属的热处理	66
4.1 钢在加热时的组织转变	67
4.1.1 奥氏体的形成过程	67
4.1.2 影响奥氏体转变的因素	69
4.1.3 奥氏体晶粒大小及其影响因素	69
4.2 钢在冷却时的组织转变	71
4.2.1 过冷奥氏体的等温转变	72
4.2.2 过冷奥氏体连续冷却转变	81
4.3 钢的热处理工艺	83
4.3.1 退火	84
4.3.2 正火	87
4.3.3 淬火	87
4.3.4 回火	93
4.3.5 表面淬火	97
4.3.6 化学热处理	101
复习思考题	107
第5章 合金钢	109
5.1 概述	109
5.1.1 合金元素在钢中的作用	109
5.1.2 合金钢的分类及编号	113
5.2 合金结构钢	115
5.2.1 低合金高强度结构钢	116
5.2.2 合金渗碳钢	116
5.2.3 合金调质钢	122
5.2.4 合金弹簧钢	126
5.2.5 滚动轴承钢	130
5.3 合金工具钢	134
5.3.1 合金刀具钢	134
5.3.2 合金模具钢	141
5.3.3 量具钢	145

5.4 特殊性能钢	147
5.4.1 不锈钢	147
5.4.2 耐磨钢	153
5.4.3 耐热钢	154
复习思考题	156
第6章 铸钢与铸铁	157
6.1 铸钢	157
6.1.1 碳素铸钢的化学成分及力学性能	157
6.1.2 铸钢的组织特征和热处理	158
6.2 铸铁	158
6.2.1 铸铁的石墨化	158
6.2.2 铸铁的组织特征和分类	161
6.2.3 铸铁的性能特点	162
6.2.4 常用铸铁	163
复习思考题	177
第7章 有色金属与粉末冶金材料	178
7.1 铝及铝合金	178
7.1.1 铝及铝合金的性能特点	178
7.1.2 铝合金的分类	178
7.1.3 铝合金的热处理	179
7.1.4 变形铝合金	180
7.1.5 铸造铝合金	185
7.2 铜及铜合金	189
7.2.1 铜及铜合金的性能特点	189
7.2.2 纯铜	190
7.2.3 黄铜	190
7.2.4 青铜	194
7.2.5 白铜	197
7.3 镁及镁合金	198
7.3.1 工业纯镁	198
7.3.2 镁合金	199
7.4 钛及钛合金	201
7.4.1 工业纯钛	201
7.4.2 钛合金	201
7.5 滑动轴承合金	203

7.5.1 对轴承合金性能的要求	203
7.5.2 轴承合金的组织特点	203
7.5.3 轴承合金的分类及用途	204
7.6 粉末冶金材料	208
7.6.1 粉末冶金机器零件材料	208
7.6.2 粉末冶金工具材料	209
复习思考题	211
第8章 非金属材料	212
8.1 高分子材料	212
8.1.1 高分子材料的基本知识	212
8.1.2 高分子材料的性能	219
8.1.3 常用工程高分子材料及应用	220
8.2 陶瓷材料	225
8.2.1 陶瓷材料的结合键、组成相与基本性能特征	225
8.2.2 陶瓷材料的分类	228
8.2.3 典型结构陶瓷简介	228
8.3 复合材料	231
8.3.1 复合材料基本知识	231
8.3.2 复合材料增强机理	232
8.3.3 复合材料的性能特点	234
8.3.4 典型复合材料及用途	235
复习思考题	237
第9章 铸造	238
9.1 铸造工艺基础	239
9.1.1 液态合金的充型能力	239
9.1.2 铸件的凝固	241
9.1.3 铸造合金的收缩性	243
9.2 铸造方法	250
9.2.1 砂型铸造	251
9.2.2 特种铸造方法	254
9.2.3 常用铸造方法的比较	259
9.2.4 铸件质量和常见铸造缺陷	260
9.3 铸造工艺设计	263
9.3.1 浇注位置和分型面的选择	263
9.3.2 铸造工艺参数的确定	267

9.3.3 确定浇注系统	273
9.3.4 绘制铸造工艺图	274
9.3.5 铸件结构工艺性	277
9.4 常用铸造合金的生产	283
9.4.1 铸铁件的生产	284
9.4.2 铸钢件的生产	286
9.4.3 有色合金铸件的生产	286
复习思考题	287
第 10 章 金属压力加工	289
10.1 锻压工艺基础	290
10.1.1 金属的塑性变形过程	290
10.1.2 塑性变形对金属组织和性能的影响	295
10.1.3 塑性变形金属的回复与再结晶	297
10.1.4 冷变形与热变形	299
10.1.5 金属的塑性成形性能	300
10.2 锻造	302
10.2.1 自由锻	302
10.2.2 模锻	309
10.3 板料冲压	316
10.3.1 冲压设备	317
10.3.2 板料冲压基本工序	318
10.3.3 冲压模具	326
10.4 先进压力加工方法简介	329
10.4.1 精密模锻	329
10.4.2 超塑性成形	330
10.4.3 高速高能率成形	331
10.4.4 辊轧成形	333
10.4.5 旋压成形	335
10.4.6 精密冲裁	336
复习思考题	337
第 11 章 焊接	339
11.1 电弧焊	340
11.1.1 焊接电弧	340
11.1.2 焊接过程	341
11.1.3 焊接应力与变形	344

11.1.4	焊条电弧焊	348
11.1.5	埋弧焊	350
11.1.6	气体保护焊	352
11.2	气焊与气割	352
11.2.1	气焊	353
11.2.2	气割	354
11.3	其他常用焊接方法	354
11.3.1	电阻焊	354
11.3.2	摩擦焊	356
11.3.3	钎焊	357
11.3.4	电渣焊	358
11.3.5	等离子弧焊接与切割	359
11.3.6	真空电子束焊接	360
11.3.7	激光焊接	361
11.4	常用金属材料的焊接	361
11.4.1	金属材料的焊接性	361
11.4.2	碳钢的焊接	362
11.4.3	合金结构钢的焊接	363
11.4.4	奥氏体不锈钢的焊接	363
11.4.5	铸铁的焊补	364
11.4.6	有色金属的焊接	365
11.5	焊接结构设计	367
11.5.1	焊接结构件材料的选择	367
11.5.2	焊缝的布置	368
11.5.3	焊接接头的设计	371
	复习思考题	375
第 12 章	机械零件的选材	376
12.1	零件失效分析	376
12.1.1	失效与失效分析	376
12.1.2	失效的分类	377
12.1.3	失效的主要原因	377
12.1.4	失效分析的基本步骤	378
12.2	零件材料的选择	378
12.2.1	选材及其意义	378
12.2.2	零件材料选择的基本原则	379

12.2.3 现代选材方法介绍.....	382
12.3 典型零件材料及工艺选择	385
12.3.1 轴的选材与工艺	385
12.3.2 齿轮的选材与工艺.....	390
12.3.3 箱体类零件的选材及工艺分析	393
复习思考题	394
参考文献	395

绪 论

材料是人类用以制作有用物件的物质,是人类社会进步的物质基础和先导。人类历史的发展无不伴随着材料的发明、应用和发展。从原始社会以来,人类经历了石器时代、青铜器时代和铁器时代。现在已经跨进按照人类的需要设计材料、合成材料 and 应用材料的新时代。目前,材料的发展水平和利用程度已成为人类文明进步的标志。

工程材料通常可按成分特点分为金属材料、无机非金属材料、高分子材料和复合材料四大类。按使用性能(用途),工程材料可分成结构材料 and 功能材料两大类。结构材料是以力学性能为基础,用来制造承受力、能量或传递运动等的结构件。从房屋、桌椅、路面等使用的建筑材料,家用压面机、厨具、火车、汽车等使用的机械工程材料及飞机、航天领域中使用的航空航天材料到石油和化工领域的储罐、反应塔、钻机等使用的金属材料,结构材料数量巨大、应用无处不在。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而形成的一类材料。功能材料虽数量有限,然而品种繁多、功能奇特,已在日常生活以及高科技领域发挥着不可估量的作用,如计算机磁盘、助听器、住宅走廊的光/声控电灯、录音机磁头、光导纤维等。工程材料的研究对象主要是结构材料。在各种机械设备中,目前应用最广、最多的仍然是金属材料,占整个材料的 80% ~ 90%。这是由于金属材料具有比其他材料更独特的性质 and 远为优越的使用性能。无机非金属材料、高分子材料和复合材料用于机械工程领域的量也越来越多,并逐步显示出广阔的发展前景。随着经济的飞速发展和科学技术的进步,对材料的要求越来越苛刻,结构材料正在向高比强度、高刚度、高韧性、耐高温、耐腐蚀、抗辐照 and 多功能的方向发展。本课程主要研究金属材料,并对无机非金属材料、高分子材料和复合材料作简要介绍。

金属材料在工程上表现出的力学性能,是由其内部的组织和结构所决定的,不同化学成分的金属材料性能迥然不同,这是由于他们的组织不同所致。相同化学成分的金属材料,经过不同的加工过程,其性能也有很大差别。通过合理的加工方法来进一步提高金属材料的性能,是充分发挥金属材料潜力的重要方法之一。机械热加工与材料科学密切相关,它是建立在金属学及材料科学基础上的。金属材料热加工可以按照人们预定的设计要求使工件成形,具有少、无切屑的优点,容易实现快速制造,因而仍然是一个正在蓬勃发展的学科领域。

机械工业是材料应用的重要领域,随着机械工业的发展,对产品的要求越来越高。在产品的设计与制造过程中,会遇到越来越多的材料及材料加工方面的

问题,这就要求机械工程技术人员必须掌握必要的材料科学与材料加工工艺知识,具备正确选择材料和加工方法、合理安排加工工艺路线的能力。

各种材料的性能直接影响到产品的质量、寿命和可靠性,如何提高工程材料的质量、寿命和可靠性,实现传统材料的高性能和可持续发展,不断研究开发新材料、新工艺是今后努力的方向。

本课程是研究金属学的基础知识、常用工程材料、热处理、毛坯零件成形工艺、常用工程材料的选择等的一门综合性课程,是高等学校机械、材料、管理等类专业必修的技术基础课,也是培养复合型人才的重要工程技术入门课程。

本课程的主要任务是:

(1) 从工程材料的应用角度出发,阐明工程材料的基础理论,了解材料的化学成分、加工工艺、组织结构与性能之间的关系。

(2) 介绍常用工程材料的种类、成分、组织、性能和改性方法,具备选用工程材料的初步能力。

(3) 阐述铸造、锻压、焊接等成形与加工方法的基本原理和工艺特点,具备选择毛坯、零件加工方法及工艺分析的初步能力。

(4) 具有综合运用工艺知识分析零件结构工艺性的初步能力。

(5) 结合实例介绍机械零件材料的选择原则和方法,具备机械零件选材和安排冷、热加工工艺路线的能力。

(6) 了解与本课程有关的新材料、新工艺、新技术的特点及其发展趋势。

本课程的目的是使学习者掌握工程材料的基本理论和基本知识以及主要工程材料或器件的成形与加工方法的基本原理和工艺特点。通过本课程的学习,要求学习者结合现代工程训练或金工实习环节,获得常用工程材料、各种零件或器件的加工工艺知识;具备根据机械零件使用条件和性能要求,对结构零件进行合理的选材、确定毛坯和零件加工方法及制订零件加工工艺路线的初步能力;为后续课程的学习以及以后从事机械设计和加工制造工作奠定必要的基础。

第 1 章 材料分类及性能

材料是人们用来制成机器、器件、结构等具有某种特性的物质的实体,人们感触到的任何东西都是由材料构成的。材料和人类社会的关系极为密切,它是人类赖以生活和生存的物质基础。不同的材料具有不同的性能,人们可以根据自己的需要来设计和制造某种产品,那么,要保证这些产品的有效使用,形成产品零件的材料之性能就必须满足要求。随着时代发展和科技进步,人们对一些材料的性能不断提出更高的要求,促进了新材料的研究和发展。人类所用材料的创新和进步又大大推动了社会生产力的发展,所以,新材料的研究和应用标志着历史发展和人类文明的进程。人类文明的发展史实际上就是一部学习利用材料、制造材料、创新材料的历史。

1.1 材料的分类

材料的种类繁多,目前世界上传统材料已有几十万种,而新材料的品种正以每年大约 5% 的速度增长。从 1950 年到现在,已知的化合物已从 200 万种增至 1 000 万种,而且还在以每年 25 万种的速度递增。材料的分类方法也多种多样,尚无统一的标准。

从使用领域的角度,材料可分为机械工程材料、建筑工程材料、电子材料、核材料等。

从开发、应用时间的长短,材料可分成传统材料和新型材料(或先进材料)。

按使用性能(用途),将材料划分成结构材料和功能材料两大类。结构材料是以力学性能为基础,用来制造承受力、能量或传递运动等的结构件。从房屋、桌椅、路面等使用的建筑材料,家用压面机、厨具、火车、汽车等使用的机械工程材料及飞机、航天领域中使用的航空航天材料到石油和化工领域的储罐、反应塔、钻机等使用的金属材料,结构材料数量巨大、应用无处不在。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而形成的一类材料。功能材料虽数量有限,然而品种繁多、功能奇特,已在日常生活以及高科技领域发挥着不可估量的作用,如计算机磁盘、助听器、住宅走廊的光/声控电灯、录音机磁头、光导纤维等。当然,结构材料和功能材料并不能截然分开,如最普通的窗玻璃,既有结构性作用(做成门窗构件),又有透光等功能性作用;机床床身既要起结构性支撑作用,又要具有功能性减振能力。

按材料的结晶状态可分为单晶体材料、多晶体材料及非晶体材料。

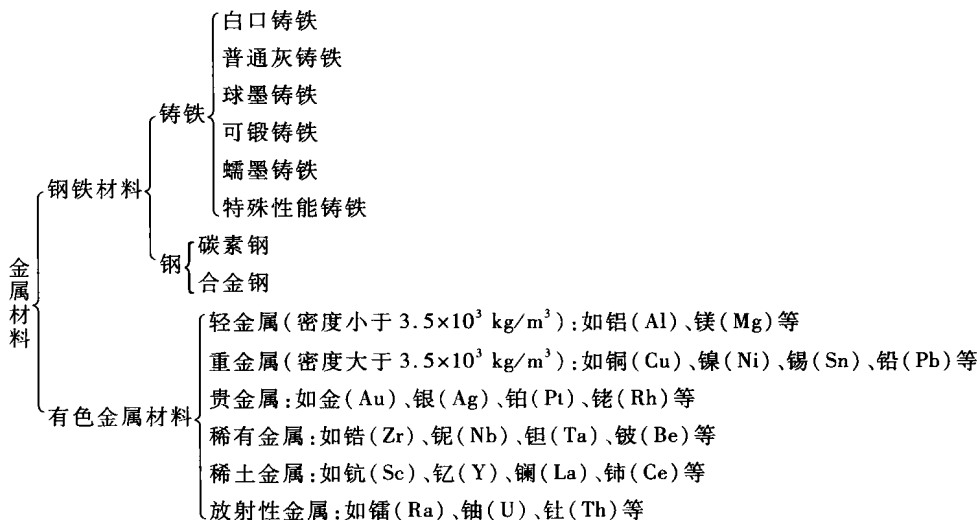
按材料的物理性能及物理效应又可分为半导体材料、磁性材料、激光材料、热电材料、光电材料等。

按材料的组成和物理化学属性可分为金属材料、无机非金属材料(陶瓷)、高分子材料和复合材料四大类。工程上通常以这种方式对材料进行分类。

1.1.1 金属材料

金属材料是指化学元素周期表 B-At 线左侧的全部元素和由这些元素构成的合金材料。其主要特征是具有金属光泽、良好的塑性、导电性、导热性、较高的刚度和正的电阻温度系数。这是工程领域中用量最大的一类材料。依据其成分又分为由铁和以铁为基的合金构成的钢铁材料和由除铁以外的其他金属及其合金构成的非铁(有色)金属材料两大类,详见表 1.1。其中钢铁材料因其具有优良的力学性能、工艺性能和低成本等综合优势,占据了主导地位,达金属材料用量的 95%,并且这种趋势仍将延续一段时间。

表 1.1 不同系列的金属材料

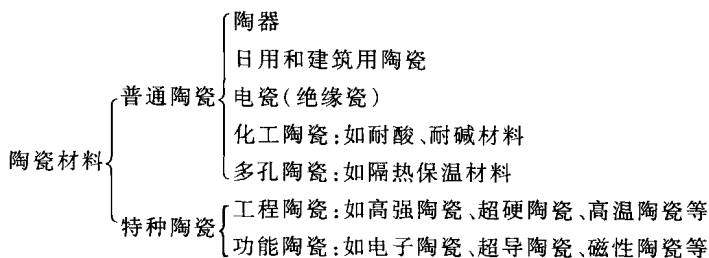


1.1.2 陶瓷材料

陶瓷材料主要指以一种或多种金属元素同非金属元素的氧化物、碳化物、氮化物等化合物及硅酸盐为原料,经成形、烧结后所形成的无机非金属多晶材料。它们有的是以离子键为主的离子晶体,有的是以共价键为主的共价晶体,而完全由其中一种结合键组成的陶瓷材料不多,多数是二者的混合键。其主要特征是耐高温、耐蚀、高强度、高脆性、无塑性。按照习惯,陶瓷一般分为普通陶瓷和特

种陶瓷两大类。普通陶瓷主要包括用于日用、建筑、卫生等领域的陶瓷以及工业上应用的电器绝缘陶瓷(高压电瓷)及化工耐酸陶瓷和过滤陶瓷等,详见表 1.2。特种陶瓷具有独特的力学、物理、化学、电、磁、光学等性能,能满足工程技术的特殊要求,是发展宇航及原子能和电子等高、精、尖科学技术不可缺少的材料,并已成为高温材料和功能材料的主力军。

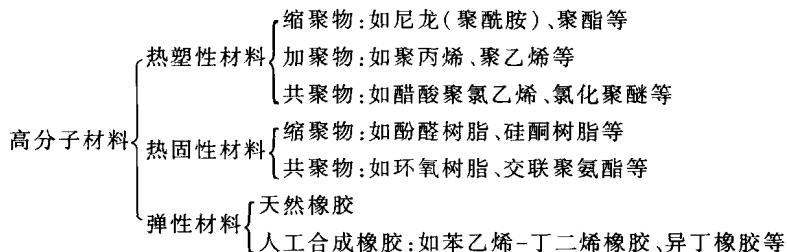
表 1.2 不同系列的陶瓷材料



1.1.3 高分子材料

高分子材料是以高分子化合物为主要组分的材料,主要含碳、氢、氧、氮、氯、氟等元素。高分子材料的原子间存在着很强的共价键,而高分子与高分子之间的结合键是分子键。其主要特征是轻、比强度高、橡胶高弹态、耐磨、耐蚀、易老化、刚性差、高温性能差,这类材料大体上可分为表 1.3 所示的系列。工程上使用的高分子材料是用石油或天然气等做原料,经一系列反应获得的合成高分子材料,包括塑料、合成橡胶、合成纤维等。目前全世界每年生产的高分子材料超过 2 亿吨,体积是钢铁的两倍,其中塑料占约 75%。高分子材料具备金属材料不具备的某些特性,发展很快,应用日益广泛,已成为工程上不可缺少的甚至是不可取代的重要材料。

表 1.3 不同系列的高分子材料



1.1.4 复合材料

复合材料是由两种或两种以上不同化学性质或不同组织结构的物质,通过

人工制成的一种多相固体材料。按增强相的性质和形态,可分为细粒复合材料、(长、短)纤维复合材料、层叠复合材料、骨架复合材料及涂层复合材料等。最常用的是纤维复合材料,如玻璃纤维复合材料(即玻璃钢)、碳纤维复合材料、硼纤维复合材料、金属纤维复合材料和须晶复合材料等。按基体的类型不同,复合材料可分为金属基复合材料和高分子基(聚合物基)复合材料。复合材料在性能上不仅保留了组成材料各自的优点,而且还有着单一组成材料不具备的优良性能。这类材料密度小、强度高、耐高温、耐磨损,不仅是航空、航天的理想材料,也是建筑、化工、机械、造船等工业领域广泛使用的材料。

1.2 材料的性能

材料性能是指材料在外界因素作用下表现出来的行为。材料性能一般分为使用性能和工艺性能两大类。材料的使用性能主要是指材料的力学、物理和化学性能。材料的工艺性能则是指材料的铸造性能、锻造性能、焊接性能及切削加工性能等。材料的这些性能不仅是设计工程机件(或构件、零件、工件)选用材料的重要依据,同时还是控制、评定产品质量优劣的标准。

1.2.1 力学性能

材料的力学性能是材料在一定环境因素下承受外加载荷时所表现出的行为,通常表现为变形(材料受到载荷作用而产生的几何形状和尺寸的变化)与断裂。材料用于结构零件时,其力学性能是工程设计的重要依据。当材料以其他性能(如物理、化学性能)为主要使用要求时,其力学性能同样是设计的主要参考依据。

拉伸试验是测定材料力学性能最常用的试验。根据 GB/T 228—2002 标准规定,该试验是将圆形或是板状的试样装在拉伸试验机上,沿试样轴向缓慢施加载荷,使其发生拉伸变形直至断裂。拉伸前后的试样如图 1.1 所示。拉伸试验机上带有自动记录装置,可绘制出载荷 F 与试样伸长量 $(l_1 - l_0)$ 之间的关系曲线,并可据此测定应力 (σ) - 应变 (ε) 关系: $\sigma = F/S_0$ (MPa)、 $\varepsilon = (l_1 - l_0)/l_0$ (%)。图 1.2 所示的是低碳钢拉伸的应力 - 应变曲线 (σ - ε 曲线)。研究表明,低碳钢在外加载荷作用下的变形过程一般可分为三个阶段,即弹性变形、塑性变形和断裂。

1. 弹性与刚度

在图 1.1 所示的 σ - ε 曲线上, OA 段表现出弹性变形特性,即去掉外力后,变形立即恢复,这种不产生永久变形的能力称为弹性。图中 A 点对应的应力 σ_e 为不产生永久变形的最大应力,称为弹性极限。 OA 段中的 OA' 部分为一直线,这部分应力与应变始终成比例,所以 A' 点对应的应力 σ_p 称为比例极限。由于 A 点和 A' 点很接近,一般不作区分。