



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

工程材料

及其成形技术基础

孙康宁 李爱菊 主编



高等教育出版社



内容简介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书在内容上力求将原金属材料及其成形技术的教学内涵向工程材料及其成形技术的教学内涵转变。在结构上力求将材料学基础与材料成形技术基础融为一体,并充分体现新的“工程材料与机械制造基础”课程教学改革思想。横向上不仅涵盖了常规材料成形技术基础,还充分体现了与现代制造技术、材料科学、现代信息技术等学科的密切交叉和融合;纵向上不仅涉及现有工程材料成形,还体现了工程材料和成形技术的历史传承和未来发展趋势。

全书分为绪论及一、二两篇,绪论主要对工程材料与成形技术进行了简述,重点介绍了工程材料、制造技术和材料成形技术的历史、现状和发展趋势。第一篇为工程材料,由四章组成,包括材料的力学性能与组织结构、工程材料的改性与表面工程、金属材料及其应用、非金属材料与复合材料。第二篇为工程材料成形技术基础,由七章组成,包括材料的液态成形工艺、材料的塑性成形工艺、材料的连接成形技术、高分子材料成形工艺、粉末冶金与陶瓷材料的成形工艺、复合材料的成形工艺、材料成形新技术。为方便学生学习,各章后均附有学习指南与复习思考题。

本书的特点是加强了工程材料与材料成形技术之间的有机联系,增加了大量新的知识,视野更开阔,模块化的特点更明显,方便相关专业科研技术人员、教师、学生对教学内容进行选择性的阅读。

本书可以作为高等学校不同专业、不同学时的工程类、管理类教材,也可以作为从事材料科学与工程、机械工程、工业管理、化工机械等相关专业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料及其成形技术基础/孙康宁,李爱菊主编.
—北京:高等教育出版社,2009.12
ISBN 978-7-04-028070-8

I. 工… II. ①孙…②李… III. 工程材料-成形-高等学校-教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 192513 号

策划编辑 庚欣 责任编辑 李京平 封面设计 张楠 责任绘图 尹莉
版式设计 余杨 责任校对 王效珍 责任印制 陈伟光

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
总机 010-58581000

经销 蓝色畅想图书发行有限公司
印刷 中青印刷厂

开本 787×1092 1/16
印张 25.75
字数 640 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版次 2009年12月第1版
印次 2009年12月第1次印刷
定价 30.20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 28070-00

前 言

“工程材料与机械制造基础”课程也简称为金工课程,内容涉及机械工程材料、材料成形工艺基础、机械制造工艺基础、机械制造实习(或金工实习)四个主要模块。根据不同专业要求,各模块内容也可以自由组合。该课程是我国工科院校最重要的技术基础课程之一,具有知识面宽,受益面大,理论与实践密切结合,实践性、创新性强,要求会动手、能操作等特点,是工科学生素质培养、能力提高、衔接社会、加强通识,实现宽口径专业教育的重要教学环节之一。

传统的金工课程知识体系源于20世纪50年代的苏联,其主要内容涉及金属材料及热处理、金属材料的成形(热加工)、金属切削工艺(冷加工)、金工实习四部分。其主线是围绕金属材料的制造与实践展开的。随着科学技术的快速发展、知识更新的加快、学科专业大幅度的调整以及在产品制造中金属材料的主导地位逐渐被其他工程材料所取代,原金工课程体系不仅内容显得陈旧,所涵盖的知识面也相对较小,从20世纪90年代后期开始已很难满足学科调整以后,后续课程对新材料、新工艺、新技术的需求。基于上述情况,20世纪90年代中后期,国内金工同行致力于将教学内容从围绕金属材料的制造与实践展开逐步扩展为围绕工程材料的制造与实践展开,但是由于长期受传统金属工艺学课程知识体系的约束,故教材内容没有完全跟上课程改革的步伐,教材的结构也缺少相应的变化。正是基于上述情况,本教材编写组根据教育部机械基础课程教学指导分委员会工程材料与机械制造基础课程指导小组制定的新的教学要求,在前期教学改革成果的基础上,为满足某些专业对工程材料及其成形技术基础部分的特别要求专门编写了本书。本书的主要特点如下:

(1) 构建了新的知识体系。在新的知识体系下,不仅实现了与重点院校“工程材料与机械制造基础”课程改革指南要求的对接,而且也尽可能地体现了教学内容的前瞻性。

(2) 充分体现了材料、机械、控制、管理与计算机等学科之间的交叉与融合。

(3) 实现了从金属材料制造到工程材料制造,从面向工科教学到面向多学科教学等方面的转变。

(4) 增加了下面一些内容:材料及成形技术的发展史与研究进展;将传统金属材料的性能扩展为常用工程材料的性能,将金属材料的基础知识扩展为材料学的基础知识,将金属热处理扩展为表面工程技术和非金属材料的热处理;将金属材料的成形技术扩展为工程材料的成形技术,使新材料、新技术、新工艺的内容有了大幅度的增加。

(5) 内容上体现出既系统丰富又重点突出的风格,为学生预留出足够的自学与思考的空间,每章附有学习指南和与其他章节相互关联的提示。做到各章节既相互联系,又相对独立,以适应培养复合型、创新型人才的需求,并方便不同专业、不同知识背景、不同学时、不同层次的学生选用。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,全书分为绪论及第一、二两篇,由山东大学孙康宁、李爱菊担任主编,山东大学张景德、毕见强、龚红宇担任副主编,清华大学傅水根教授审阅。其中,绪论由孙康宁编写,主要对工程材料与成形技术进行了简述,重点介绍了工程材料、制

造技术和材料成形技术的历史、现状和发展趋势。第一篇为工程材料,由李爱菊主编。由四章组成,包括第1章材料的力学性能及其组织结构、第2章工程材料的改性与表面工程、第3章金属材料及其应用、第4章非金属材料与复合材料。其中,第1章、第2章及第4章4.1~4.3由李爱菊编写,第3章由青岛科技大学付平、孙康宁编写,第2章第5节由孙康宁编写。第二篇为工程材料成形技术基础,由七章组成,由孙康宁、李爱菊统稿。其中,第5章材料的液态成形工艺由张景德编写,第6章材料的塑性成形工艺由山东交通学院吴承格和山东理工大学莫德秀编写,第7章材料的连接成形技术由付平和山东大学范润华编写,第8章高分子材料成形工艺由吴承格和莫德秀编写,第9章粉末冶金与陶瓷材料的成形工艺由龚红宇和江西景德镇陶瓷学院谭训彦编写,第10章复合材料的成形工艺由毕见强编写,第11章材料成形新技术由孙康宁编写。

由于编者水平有限,编写过程难免存在不妥之处,敬请各位读者提出宝贵意见。

编者

2009-01-12

本书由李爱菊、孙康宁、张景德、吴承格、莫德秀、谭训彦、毕见强、龚红宇、范润华、付平、孙康宁、李爱菊等编写。其中,第1章由李爱菊编写,第2章由孙康宁编写,第3章由张景德编写,第4章由吴承格编写,第5章由莫德秀编写,第6章由谭训彦编写,第7章由毕见强编写,第8章由龚红宇编写,第9章由范润华编写,第10章由付平编写,第11章由孙康宁编写。

[64] 郑文涛. 陶瓷材料的冷加工与热处理. 材料研究学报, 1996, 10(3): 223. (d)

[65] 郑文涛. 陶瓷材料的冷加工与热处理. 材料研究学报, 1996, 10(3): 223. (d)

[66] 陈航. 后期热处理对陶瓷复合材料性能的影响. 中国陶瓷, 1998, 38(5): 5.

[67] 王昕. 纳米氧化钛陶瓷. 陶瓷学报, 2002, 23(1): 100. (d)

[68] 刘家臣. 陶瓷材料的冷加工与热处理. 材料研究学报, 1996, 10(3): 223. (d)

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

- [73] 反盗版举报电话：(010)58581897/58581896/58581879
- [74] 反盗版举报传真：(010)82086060
- [75] E-mail: dd@hep.com.cn
- [76] 通信地址：北京市西城区德外大街4号
- [77] 何德乎 高等教育出版社打击盗版办公室
- [78] 邮编：100120

购书请拨打电话：(010)58581118

[79] 郑文涛. 陶瓷材料的冷加工与热处理. 材料研究学报, 1996, 10(3): 223. (d)

[80] 李世普. 特种陶瓷工艺学. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1990.

[81] 冶金工业出版社. 粉末冶金基础. 北京: 冶金工业出版社, 1975.

[82] 陈延敏. 电子陶瓷材料. 天津: 天津大学出版社, 1993.

[83] 西安轻工业学院. 陶瓷工艺学. 北京: 轻工业出版社, 1985.

[84] 李春娟. 陶瓷工艺学. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1997.

[85] 王成斌. 陶瓷化学. 济南: 山东大学出版社, 1996.

[86] 陈航. 陶瓷材料. 现代功能陶瓷. 北京: 国防工业出版社, 1998.

[87] 中国科学院金属研究所. 粉末冶金工艺学. 北京: 科学普及出版社, 1987.

[88] 曹培文. 粉末冶金原理. 冶金工业出版社, 1982.

[89] 陈延敏. 粉末冶金原理和应用. 殷声, 魏和怡, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1989.

[90] 汪东志. 特种陶瓷材料. 北京: 中国物资出版社, 2000.

[91] 王成斌. 陶瓷化学. 济南: 山东大学出版社, 2000.

[92] 王成斌. 陶瓷化学. 济南: 山东大学出版社, 1999.

[93] 濮良贵. 机械零件设计手册. 北京: 机械工业出版社, 2002.

[94] 倪礼忠. 复合材料. 北京: 冶金工业出版社, 2002.

[95] 齐乐华. 工程材料. 西安: 西北工业大学出版社, 2004.

[96] 蒋成禹. 材料加工工程. 北京: 清华大学出版社, 2001.

[97] 周英铃. 材料工程基础. 北京: 冶金工业出版社, 2001.

[98] 肖亚航, 雷改丽, 傅教金. 神经网络计算机模拟的研究现状及展望. 材料导报, 2005, 19

目 录

绪论	1	0.2.2 制造技术的现状	24
0.1 工程材料的发展	1	0.2.3 制造业及先进制造技术的发展趋势	25
0.1.1 金属材料的发展	2	0.3 材料成形技术的历史、现状与发展趋势	26
0.1.2 无机非金属材料(陶瓷)的发展	6	0.3.1 材料成形技术发展历史	27
0.1.3 高分子材料的发展	10	0.3.2 材料成形技术的现状与发展趋势	29
0.1.4 复合材料的发展	12	0.4 本课程的性质、学习要求和任务	31
0.1.5 其他先进材料	16	本章学习指南	32
0.1.6 工程材料的发展	22	复习思考题	32
0.2 制造(工艺)技术的发展历史、现状与发展趋势	22		
0.2.1 制造技术的发展历史	22		

第一篇 工程材料

第1章 材料的力学性能与组织结构	35	2.1.3 金属材料的塑性变形	77
1.1 工程材料的力学性能	35	2.2 陶瓷材料的强韧化措施	81
1.1.1 强度与塑性	35	2.2.1 无机非金属材料热处理	81
1.1.2 硬度	38	2.2.2 提高无机非金属材料性能的其他途径	84
1.1.3 韧性	40	2.3 提高高分子材料性能的主要途径	85
1.1.4 疲劳强度	41	2.3.1 高分子材料的改性	86
1.1.5 材料的高温性能	42	2.3.2 高分子材料的拉拔强化	87
1.1.6 粘弹性和粘流性	43	2.4 工程材料的表面工程	87
1.2 工程材料的组织结构	43	2.4.1 热喷涂	87
1.2.1 金属材料的组织结构	43	2.4.2 电镀与化学镀	91
1.2.2 陶瓷材料的组织结构	59	2.4.3 电刷镀	93
1.2.3 高分子材料的组织结构	62	2.4.4 热浸镀	94
本章学习指南	66	2.4.5 涂装	95
复习思考题	66	2.4.6 气相沉积技术	96
第2章 工程材料的改性与表面工程	68	2.4.7 高能束技术简介	97
2.1 提高金属材料性能的主要途径	68	2.5 纳米材料	97
2.1.1 金属材料的晶粒细化及其合金化	68	2.5.1 纳米材料的基本概念	98
2.1.2 金属材料的热处理	69		

2.5.2 纳米材料的性质	98	3.4.4 轴承合金	146
2.5.3 纳米固体材料	99	3.5 金属材料的选用	147
2.5.4 纳米固体材料的应用	100	3.5.1 选材的基本原则	147
2.5.5 纳米材料制备方法简介	101	3.5.2 几种材料的合理使用	148
本章学习指南	104	3.5.3 典型零件和常用工具的选 材实例	149
复习思考题	105	本章学习指南	151
第3章 金属材料及其应用	107	复习思考题	151
3.1 碳素钢	107	第4章 非金属材料与复合材料	153
3.1.1 碳钢的成分和分类	107	4.1 陶瓷材料及其应用	153
3.1.2 碳钢的牌号及用途	108	4.1.1 陶瓷材料的性能特征	153
3.2 合金钢	110	4.1.2 工业陶瓷及其应用	154
3.2.1 合金钢的分类	110	4.2 高分子材料及其应用	156
3.2.2 合金钢的编号	110	4.2.1 高分子材料的分类及其 命名	156
3.2.3 合金结构钢	111	4.2.2 塑料	157
3.2.4 合金工具钢	117	4.2.3 橡胶	161
3.2.5 特殊性能钢	122	4.2.4 有机纤维	163
3.3 铸铁	124	4.2.5 胶粘剂	164
3.3.1 灰铸铁	125	4.3 复合材料及其应用	166
3.3.2 球墨铸铁	127	4.3.1 复合材料的分类	167
3.3.3 可锻铸铁	129	4.3.2 复合材料的性能特征	167
3.3.4 蠕墨铸铁	131	4.3.3 复合材料的增强原理和复 合原则	168
3.3.5 合金铸铁	132	4.3.4 典型的复合材料	169
3.4 非铁金属(有色金属)及其合 金	132	本章学习指南	174
3.4.1 铝及铝合金	132	复习思考题	174
3.4.2 铜及铜合金	138		
3.4.3 钛及钛合金	145		

第二篇 工程材料成形技术基础

第5章 材料的液态成形工艺	179	5.2.6 新型材料——金属间化合物 及其铸造性能特点	187
5.1 金属铸造工艺简介	179	5.3 砂型铸造	188
5.2 铸造工艺基础知识	180	5.3.1 造型方法的选择	188
5.2.1 液态金属的充型能力	180	5.3.2 砂型铸造常见缺陷	190
5.2.2 合金的凝固特性	181	5.4 特种铸造	191
5.2.3 合金的收缩性	182	5.4.1 金属型铸造	191
5.2.4 合金的吸气性及气孔	185	5.4.2 熔模铸造	192
5.2.5 常用铸造合金的铸造性能 特点	186	5.4.3 压力铸造	193

5.4.4 低压铸造	194	6.4.6 高能成形	246
5.4.5 离心铸造	194	6.5 计算机在塑性成形中的应用	
5.4.6 消失模铸造	194	简介	247
5.4.7 铸造方法的选择	197	本章学习指南	249
5.5 铸件结构工艺性	198	复习思考题	250
5.5.1 铸件结构应利于避免或减少		第7章 材料的连接成形技术	253
铸件缺陷	198	7.1 连接成形技术概述	253
5.5.2 铸件结构应利于简化铸造		7.1.1 连接技术及应用	253
工艺	200	7.1.2 焊接技术概况	253
5.5.3 铸件结构要便于后续加		7.2 熔化焊连接的基本知识	254
工	202	7.2.1 焊接热过程及焊接热源	254
5.6 计算机在铸造生产中的应用		7.2.2 电弧焊基本知识	256
简介	203	7.3 常用熔化焊连接方法	262
5.6.1 系统组成	203	7.3.1 焊条电弧焊	262
5.6.2 测试系统的工作过程	203	7.3.2 埋弧自动焊	264
5.6.3 控制系统	204	7.3.3 气体保护电弧焊	266
本章学习指南	204	7.3.4 电渣焊	269
复习思考题	205	7.3.5 电子束焊接	270
第6章 材料的塑性成形工艺	206	7.3.6 激光焊接	271
6.1 塑性成型的基础知识	207	7.3.7 等离子弧焊	272
6.1.1 塑性成形基本定律	207	7.4 压焊连接方法	273
6.1.2 材料的塑性成形性	208	7.4.1 电阻焊	273
6.2 金属塑性成形方法	209	7.4.2 摩擦焊	275
6.2.1 自由锻	209	7.4.3 超声波焊接	276
6.2.2 模型锻造	216	7.4.4 扩散焊	277
6.2.3 挤压成形	221	7.5 钎焊连接方法	278
6.2.4 板材冲压成形	225	7.5.1 硬钎焊	278
6.3 锻压件结构工艺性	236	7.5.2 软钎焊	279
6.3.1 自由锻件的结构工艺性	236	7.6 常用材料的焊接	279
6.3.2 模锻件的结构工艺性	236	7.6.1 金属材料的焊接	279
6.3.3 挤压件的结构工艺性	237	7.6.2 塑料的焊接	284
6.3.4 冲压件的结构工艺性	239	7.6.3 异种材料的焊接	286
6.4 先进塑性成形方法	242	7.7 焊接结构工艺设计	286
6.4.1 精密模锻	242	7.7.1 焊接结构材料的选择	286
6.4.2 摆动辗压	243	7.7.2 焊接方法的选择	287
6.4.3 液态模锻	243	7.7.3 焊缝的布置	288
6.4.4 径向锻造	245	7.7.4 焊接接头及其设计	291
6.4.5 粉末锻造	245	7.8 材料的铆接连接	293

7.9 材料的胶接连接	294	9.2.1 粉碎与机械合金化方法	331
7.9.1 概述	294	9.2.2 合成法	332
7.9.2 胶接工艺	295	9.3 粉末冶金的成形工艺	337
本章学习指南	296	9.3.1 压制成形	337
复习思考题	296	9.3.2 粉浆浇注成形	339
第8章 高分子材料成形工艺	298	9.3.3 楔形压制	340
8.1 高分子材料成形原理	298	9.4 陶瓷材料的成形工艺	340
8.1.1 高聚物的物理状态	298	9.4.1 浆料成形	340
8.1.2 高聚合物的成形性能	298	9.4.2 可塑成形	343
8.2 塑料成形工艺	300	9.4.3 压制成形	345
8.2.1 塑料成形方法	300	9.5 烧结工艺与方法	347
8.2.2 塑料加工	303	9.5.1 烧结工艺	347
8.2.3 典型模具结构	304	9.5.2 烧结方法	348
8.2.4 塑料件的结构工艺性	310	本章学习指南	349
8.2.5 常用塑料零件的选材	312	复习思考题	349
8.3 橡胶成形工艺	313	第10章 复合材料的成形工艺	350
8.3.1 橡胶加工的工艺过程	313	10.1 复合材料简述	350
8.3.2 橡胶成形方法	315	10.1.1 复合材料的特点	350
8.4 薄膜成形技术简介	317	10.1.2 复合材料的原料	351
8.4.1 薄膜的成形工艺	317	10.1.3 复合材料的失效	352
8.4.2 拉幅薄膜的成形	318	10.1.4 复合材料的成形工艺特点 与要求	352
8.5 高分子材料快速成形方法	318	10.2 金属基复合材料成形工艺	353
8.6 计算机技术在高分子材料成形 中的应用简介	318	10.2.1 固态法	353
8.6.1 注射成型 CAD/CAM/CAE 技术简介	318	10.2.2 液态法	355
8.6.2 常用塑料成形模拟软件 简介	320	10.2.3 其他方法	357
本章学习指南	320	10.3 树脂基复合材料成形工艺	357
复习思考题	321	10.3.1 手糊成形工艺	358
第9章 粉末冶金与陶瓷材料的成形 工艺	323	10.3.2 喷射成形工艺	358
9.1 粉体成形原理	323	10.3.3 袋压成形工艺	359
9.1.1 粉料的基本物理性能	323	10.3.4 层压成形工艺	359
9.1.2 压制成形原理	325	10.3.5 模压成形工艺	360
9.1.3 可塑成形原理	327	10.3.6 拉挤成形工艺	361
9.1.4 浆料成形原理	329	10.3.7 缠绕成形工艺	362
9.2 粉体制备技术	330	10.4 陶瓷基复合材料成形工艺	363
		10.4.1 热压成形	363
		10.4.2 注射成形	363
		10.4.3 化学气相渗透工艺	364

10.4.4 直接氧化法	364	11.3.4 超塑性成形	383
10.4.5 溶胶-凝胶法	365	11.3.5 材料塑性成形计算机模拟 技术	384
本章学习指南	365	11.4 材料连接成形新工艺	384
复习思考题	365	11.4.1 机器人激光焊	384
第 11 章 材料成形新技术	367	11.4.2 混合激光 MIG/MAG 焊接 技术	386
11.1 快速成形工艺	367	11.4.3 串联 MIG/MAG 焊接技 术	387
11.1.1 快速成形原理	367	11.4.4 磁脉冲焊接技术	387
11.1.2 快速成形技术的发展 现状	368	11.4.5 摩擦搅拌焊接	388
11.1.3 快速成形技术的工艺 特点	368	11.4.6 异种材料连接技术简介	389
11.1.4 典型快速成形工艺简介	369	11.4.7 塑料焊接新技术简介	390
11.1.5 快速成形技术的应用	373	11.4.8 材料连接计算机模拟 技术	390
11.2 材料液态成形新技术	374	11.5 粉末成形与陶瓷材料成形新 工艺	391
11.2.1 液固复合成形新技术	374	11.5.1 金属粉末成形新技术	391
11.2.2 金属快速凝固成形技术	376	11.5.2 陶瓷成形新技术	394
11.2.3 材料液态成形计算机模拟 新技术	378	本章学习指南	396
11.3 材料塑性成形新工艺	380	复习思考题	397
11.3.1 金属复合成形技术	380		
11.3.2 多向锻造技术	381		
11.3.3 热冲压成形技术	382		
参考文献	398		

材料等。人类历史证明,材料是人类社会进步的物质基础和先导。

材料品种和用途千差万别,世界各国对材料的分类虽然不尽相同,但按照传统的分类方法(按材料的性能)可以分为金属材料、无机非金属材料(陶瓷)、有机高分子材料和复合材料四大类。这四类材料虽然都经历了漫长的发展过程,但其在不同历史阶段所具有的相对重要性却是不断变化的。图 0-1 中对其相对重要性进行了直观的描述。

现代工程材料的分类方法很多。除传统的分类方法外,还可以按照材料的使用功能将材料分为结构材料、功能材料、生物材料、智能材料、生态环境材料、信息功能材料等;按照材料的维度分为三维块体材料、二维薄膜材料、一维纤维材料和零维纳米颗粒材料等;按照组成材料的尺度分为毫米级材料、微米级材料、纳米级材料、分子和原子级材料等。事实上,材料种类不同,不仅性能、用途差异巨大,而且制备工艺与材料成形技术也各不相同,但是不管哪种材料,它们各自的应用领域都起着十分重要的作用。本节将结合部分材料的发展现状加以介绍。

绪 论

现代工业门类繁多,但概括起来,可分为材料工业、能源工业、建筑业和制造业等几种。其中,材料工业与制造业密切相关,材料工业是将自然资源制备成具有各种性能或功能、能满足各种要求的工程材料的产业。制造业是指对制造资源(物料、能源、设备、工具、资金、技术、信息和人力等),按照市场要求,通过制造过程转化为可供人们使用和利用的工业品与生活消费品的行业。制造业涉及很多领域,机械制造是制造业的主体。其中,工程材料的成形与控制又是机械制造业的重要组成部分。材料成形的主要目的是利用材料的各种性能和形态,借助相关技术成形为所需要制品的形状(或获得所需要的性能)。就本课程而言,工程材料与材料成形技术是密不可分的,因为学习材料成形离不开对工程材料的了解,材料成形技术的发展也在不断促进新材料制备技术的出现。因此,学习材料成形技术,除要了解材料的特点、性能外,还需要对工程材料的发展有一个基本的了解。为此,本章将重点介绍工程材料、制造技术和材料成形技术的历史、现状和发展趋势,希望大家在学习工程材料及其成形技术基础之前,对工程材料和制造技术的背景有一个比较完整的了解,以利于本课程的学习。

0.1 工程材料的发展

材料是人类用以制作有用物件的物质,而新材料主要是指近年发展起来或正在发展之中的具有特殊功能和效用的材料;或者是采用新技术、新工艺使传统材料性能有明显提高或产生新功能的材料。传统材料是指那些已大量生产和应用的材料,如钢铁材料、有色金属材料、化工材料、建筑材料等。新材料则包括信息材料、新能源材料、生物医用材料、纳米材料、智能材料、超导材料等。人类历史证明,材料是人类社会进步的物质基础和先导。

材料品种和用途千差万别,世界各国对材料的分类虽然不尽相同,但按照传统的分类方法(按材料的性能)可以分为金属材料、无机非金属材料(陶瓷)、有机高分子材料和复合材料四大类。这四类材料虽然都经历了漫长的发展过程,但其在不同历史阶段所具有的相对重要性却是不断变化的。图0-1中对其相对重要性进行了直观的描述。

现代工程材料的分类方法很多。除传统的分类方法外,还可以按照材料的使用功能将材料分为结构材料、功能材料、生物材料、智能材料、生态环境材料、信息功能材料等;按照材料的维度分为三维块体材料、二维薄膜材料、一维纤维材料和零维纳米颗粒材料等;按照组成材料的尺度分为毫米级材料、微米级材料、纳米级材料、分子和原子级材料等。事实上,材料种类不同,不仅性能、用途差异巨大,而且制备工艺与材料成形技术也各不相同,但是不管哪种材料,它们各自的应用领域都起着十分重要的作用。本节将结合部分材料的发展现状加以介绍。

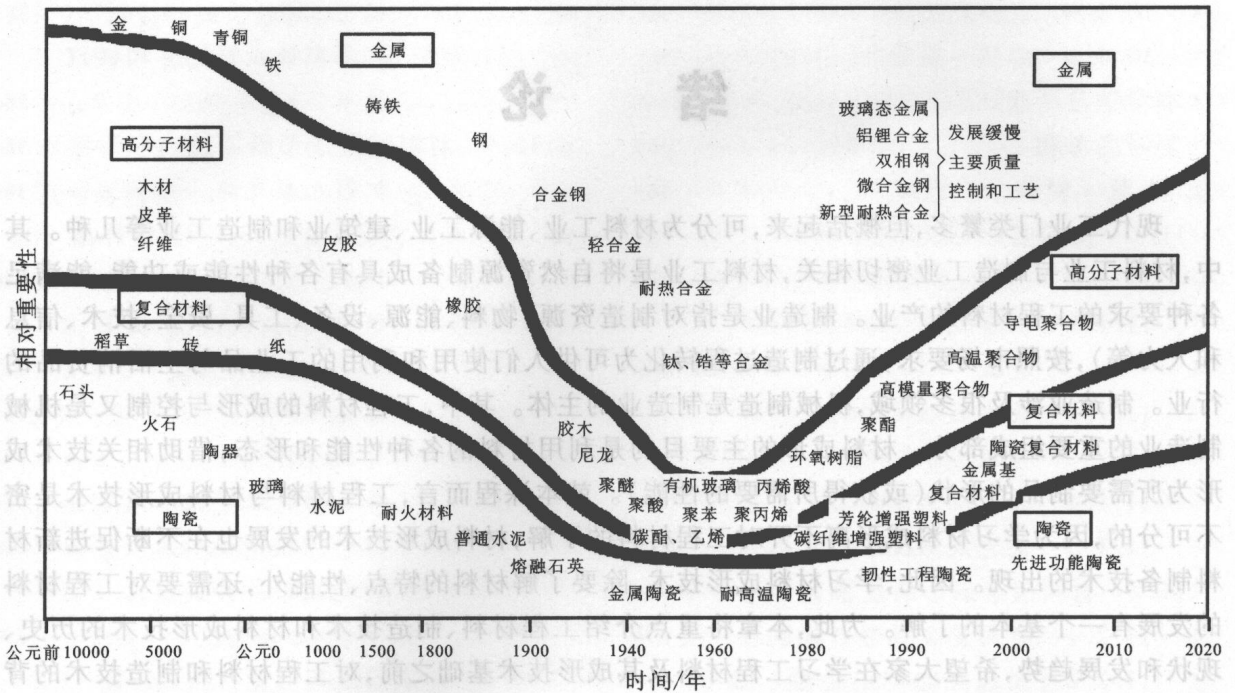


图 0-1 工程材料发展历史随时间推移的相对重要性示意图(时间是非线性的)

0.1.1 金属材料的发展

众所周知,金属材料具有其他材料不可能完全取代的独特性质和使用性能,金属材料主要通过金属键结合而成,这种键合特点使得金属具有比高分子材料高得多的模量,比陶瓷高得多的韧性、可加工性、磁性和导电性。正是上述特点使金属材料迄今为止不仅难以被快速发展的其他材料所替代,还在不断地推陈出新,在工程材料中占有十分重要的地位。

1. 金属材料的发展史

金属材料是一种历史悠久、发展成熟的工程材料。早在公元前 5000 年,人类就已发现并开始使用金属材料,我国在商代即有青铜器出现,春秋战国时期开始使用铁器。以后随着铁和钢冶炼方法的发现和不断改进,人类社会生产力水平不断提高,到了 18 世纪英国产业革命期间,钢铁工业开始迅猛发展,成为产业革命的主要潮流和物质基础。铝合金的运用也已有 100 年的历史,就连钛合金的应用都已有 60 多年了。到 20 世纪中叶,金属材料不仅在材料工业中占有主导地位,而且发展日新月异,例如:19 世纪 20 年代法拉第开始研究合金钢,1839 年巴比特研制出轴承合金,1856 年贝斯麦在转炉中将生铁精炼成钢,1906 年泰勒和霍特研制出切削用的高速钢,1911 年德国杜伦开始时效硬化铝(杜拉铝)的工业化生产,1912 年英国的布莱尔发明马氏体不锈钢,1912 年美国的海恩兹发明切削刀具用的钨铬钴硬质合金,1923 年克虏伯公司发明钨钴硬质合金,弗来伊公司发明钢氮化表面硬化法,1938 年克诺尔和卢斯卡发明电子显微镜,1940 年日本北圆一郎和五十岚勇发明超硬铝,1948 年美国的米尔斯通过在铸铁水中加镁的方法成功地制成球墨铸铁,1952 年杜立确立了纯氧顶吹转炉炼钢法(LD 法),1959 年福特公司研制出 TiC 金属陶瓷(TiC - Ni - Mo 合金)切削刀具,1960 年美国瓦卡恩公司研制出超导体材料——Nr - Zr 合金,

1970年美国和瑞典研制出粉末高速钢,1973年日本钢产量首次超过1亿吨。在这期间,以氧气顶吹为代表的炼钢工艺,使钢铁生产能力得到前所未有的突破,以轴承合金、球墨铸铁、超硬铝、硬质合金等为代表的一大批金属新材料,极大地满足了现代工业生产的需要,以电子显微镜为代表的金属材料检测仪器的发明以及钨钴硬质合金、碳化钛金属陶瓷为代表的刀具材料的研制成功,反过来进一步推动了金属材料的发展。

应该说金属材料的发展历史是悠久的,进入19世纪后呈现出超乎寻常的发展速度,出现了前所未有的辉煌。随着人类文明的演进,金属材料一直扮演着重要的角色,与人类生活息息相关的衣、食、住、行无不处处见其踪迹。例如,陆、海、空各类运输工具,桥梁、建筑、机械、工具、国防、重工业等不胜枚举。

2. 金属材料的发展现状

自20世纪50年代以后,近半个世纪以来,随着高分子材料(尤其是高分子合成材料)、无机非金属材料(尤其是先进陶瓷材料)以及金属基、陶瓷基和树脂基先进复合材料的发展,开始出现一些金属材料的代用品。如高技术陶瓷、高分子材料、先进复合材料已经发展成为一些独立的工业体系,出现了所谓“高分子时代”、“先进陶瓷时代”、“先进复合材料时代”等提法,这实质上反映了新材料对传统金属材料的挑战,在这种严峻的形势下,出现了钢铁材料是否已进入“夕阳”工业的争论,尽管新型塑料、陶瓷、复合材料的平均年增长率分别超过16%、8%、7%,而新型金属材料平均年增长率仅2%~3%(我国例外,2007年增长率超过18%),但是新型金属材料及制品的营业额却超过了其他新材料及制品营业额的总和。例如,2007年我国以4.89亿吨再次成为全球第一大粗钢产量生产国,这说明金属材料毕竟是一种系统、完整、历史悠久的传统材料,其基数大、增长率低并没有掩盖其在新材料发展中的重要地位,其中最重要、最根本的原因是金属材料具有其他材料体系不可能完全取代的独特性质和使用性能,而且金属材料也在不断地推陈出新,向极限材料挑战,新金属材料近几十年来已取得长足的进展。归结起来主要围绕以下几个方面向纵深发展。

(1) 高纯材料 以超高纯铁为例,在高纯状态,纯铁不仅有优异的软磁性能、良好的耐腐蚀性能,高的残余电阻率,而且以高纯铁为基础进行合金研制,预计在高真空容器、极低温材料、核反应堆材料等方面的应用将十分引人注目。

(2) 高强度及超高强度金属材料 超高强度是当代材料研究为减轻重量、节省资源而追求的设计目标。这在航空、航天、原子能、深海潜艇等领域有极大的需求,典型的代表是飞机起落架。提高材料强度,严格地讲,一是指提高抵抗塑性变形的能力,二是提高材料抵抗破坏的能力。提高抵抗塑性变形的能力通常叫强化,提高材料抵抗破坏的能力叫韧化,两者同时提高,则称强韧化。典型超高强度材料包括超高强度钢、高强度铝合金、高强度钛合金等。

(3) 超易切削钢与超高易切削钢 金属材料通常要求机械加工,据统计,切削加工费用大约占制造总成本的75%。实验表明,若改成超高易切削钢,刀具寿命可提高30倍,因此零件成本会大幅度下降,甚至可减少一半。其社会效益和经济效益极其显著。

超易切削钢主要设计原理为:通过加入硫、铅、钙等元素,使材料本身存在孔洞和软物质。

(4) 硬质合金与金属陶瓷 工具和耐磨材料通常要求高硬度、高耐磨性、耐高温、抗氧化,因此传统金属材料难以胜任。自1923年德国史律泰尔发明碳化钨钴合金以来,各种硬质合金和金属陶瓷材料发展迅速,尤其在刀具、模具、轧辊、耐磨材料等领域得到十分广泛的应用,其中硬质

合金除 WC - Co 等系列外, WC - TiC - TaC - Co 系列以及各种新的系列(包括各种表面陶瓷涂层刀具)发展迅速。经过几十年的发展,硬质合金性能已有极大提高,例如硬度可达 93HRA,抗弯强度可超过 300 MPa,其用途更广泛。今后仍需研究解决的问题包括:刀具与被切削材料的反应、积屑瘤问题、物理性能与杂质关系等。

金属陶瓷(cermet)最早是作为耐磨材料而设计的,它是金属材料(metals)与陶瓷(ceramics)的复合材料。目前,新的金属陶瓷材料不仅用于耐磨材料,而且已用于刀具和模具,例如由 $\text{Al}_2\text{O}_3 + (\text{WC} * \text{TiC})\text{C} + \text{Mo} + \text{Ni}$ 等成分组成的金属陶瓷,其硬度可达 94.5HRA,抗弯强度达 1 250 MPa,断裂韧性达 $8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,综合性能优异。

(5) 耐热钢与高熔点合金 耐热钢是指那些能够抵抗高温对性能的不利影响,可以在较高温度下安全使用的钢种,通常需要具备耐氧化性、耐高温腐蚀性、良好的蠕变强度、持久强度、热疲劳强度等。例如:由于飞机涡轮发动机进口温度高达 1 240 °C 以上,因此飞机发动机喷嘴及动静叶片也必须在 1 000 °C 或更高温度下可靠地工作。目前,可用于高温合金的材料主要由铁、镍、钴组成,其中当含铁量大于 50% 时,称为耐热钢;当含铁量小于 50% 时,称为高温合金。研究表明,镍基高温合金较钴基合金发展更快,典型合金有尼莫尼克合金(由 Ni、Cr、Ti、C 等元素组成)等。

高熔点合金也称难熔合金,其熔点通常在 2 000 °C 附近,难熔合金通常是指在超高温(超过 1 300 °C)下仍具有很高强度的合金,由铌、钼、钽、钨等高熔点合金组成,但是上述合金也有缺点,如易氧化、密度大、熔点高、难熔炼、难加工等。目前已研制出的合金有铌基合金、钼基合金、钽基合金、钨基合金。制备方法包括电子束法熔炼、粉末冶金法等。其中,钽基合金高温使用温度为 1 650 ~ 1 930 °C,低温使用温度为 -240 °C,该材料低温韧性好,使用温度范围宽。钨基合金使用温度最高,可高达 2 000 °C。

(6) 纤维增强金属基复合材料 该类复合材料的比强度极高,其强度 σ_c 很大程度上取决于增强体纤维强度 σ_f 。目前可供选择的纤维较多,如硼纤维、碳纤维、碳化硅纤维、玻璃纤维、氧化铝纤维等。纤维的选择原则是比重小、弹性模量大、强度高。金属复合材料的发展目标是制备出各种比强度、比弹性模量高的材料。

(7) 共晶合金定向凝固材料 该材料属新型复合材料,是共晶合金在特殊工艺条件下制备出来的复合材料,其性能特点是在超高温情况下呈现更高强度。它是通过温度梯度定向凝固,使共晶各相在本身的相上连续长大而成的复合材料,这种复合也叫原位复合。目前已研制出的典型材料有 Cu - Cr 共晶合金(Cr 为晶须,占 1.6wt%)、Al - Al_3Ni 共晶合金(Al_3Ni 为晶须,占 0.1wt%),此外 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZnO}_2$ 陶瓷复合材料也在研究进行中。

共晶合金定向凝固材料可广泛用于涡轮叶片等耐热材料,也可以用于偏光材料。

(8) 快速冷凝金属非晶及微晶材料 快速冷凝技术是 20 世纪下半叶以来材料制备技术中的重大突破,自从 1960 年 Duwez 等人采用 Au - Si 合金首次制备出非晶相以来,产生了一系列非平衡态的金属合金,包括非晶、微晶、纳米晶、准晶。其技术关键是极快的冷凝速度。常规冷凝速度如果在 $10^{-5} \sim 10^3 \text{ K/s}$ 之间,则凝固后枝晶间距为 5 000 ~ 500 μm ;快速冷凝速度高达 $10^3 \sim 10^6 \text{ K/s}$ 甚至更高,此时枝晶间距为 5 ~ 0.5 μm 甚至小于 0.5 μm 。快速冷凝可以导致形成非晶和微晶材料。

典型金属非晶和微晶材料包括:

1) 金属玻璃 非晶(amorphous)态金属材料具有类似玻璃的某些结构特征,固称为金属玻璃。金属玻璃具有很多优异的性能,如超耐腐蚀性、高磁导率、恒弹性、高强韧性、低热膨胀系数、高磁致伸缩等。目前典型合金有 Fe₈₂B₁₀Si₈ (Metglass2605S2) 等,主要用于变压器铁芯。与普通变压器相比,空载损耗可节约 2/3,社会与经济效益十分巨大。研究发现,通过适当的热处理工艺,可以将非晶态金属或合金制成纳米块体材料。

2) 金属微晶材料 微晶(microcrystallites)材料的晶粒度比常规材料的晶粒度小 1~2 个数量级,并具有一系列组织性能上的优点。这主要是由于快速凝固增大了溶质原子在基体中的固溶极限,同时固液界面推进速度很大,长程扩散被抑制,来不及扩散的原子被正在凝固的固相所俘获,这就使固溶强化及时效沉淀强化的效果显著,使材料强度增高。此外,微小的晶粒度也使得材料的强度、韧性、抗蚀性、耐磨性、抗疲劳断裂性能得以提高。快速凝固合金包括快速凝固轻合金(铝、镁、钛)、快速凝固铜合金、快速凝固铁合金、镍合金、钴合金以及快速凝固金属间化合物。

(9) 有序金属间化合物 金属间化合物是新一代高温结构材料,它是由两种或两种以上金属元素结合而成的化合物(现在已不完全限于金属元素,一部分可以是非金属元素)。这类化合物与正常价化合物之间的区别在于,在金属间化合物的晶体结构中,构成元素的原子以整数比构成化合物,不是按照化学价的概念,而是按照金属键或部分共价键结合,由于原子在晶体中作长程有序排列,因而也称有序金属间化合物。有关金属间化合物的研究已有 100 多年的历史,已发现的金属间化合物已达 2 万种,由两个组元 A 和 B 组成的金属间化合物一般具有 AB、A₂B、A₃B、A₅B₃、A₇B₆ 等类型,由于金属间化合物具有长程有序的特殊结构,故其有许多特殊的物理、化学、力学性质。作为结构材料,其突出的性能包括高温强度高、抗氧化性好、弹性模量高、密度低、疲劳强度和蠕变性能较好等特点,某些金属间化合物的屈服强度还有随温度升高而提高的反常特性。正是由于金属间化合物具有比陶瓷材料高的韧性,比高温合金低的密度,所以通常认为金属间化合物是介于高温合金与陶瓷材料之间的一类新型高温结构材料(也称之为半陶瓷材料)。但是,金属间化合物也有缺点,即其塑性和韧性较低、加工性能差。目前,改善金属间化合物性能的方法包括金属间化合物的微合金化和宏观合金化以及制备金属间化合物与陶瓷或金属的复合材料等。就目前我国研究工作者和美国橡树岭国家实验室等单位的研究报道来看,金属间化合物的塑性已有突破性的进展,典型的金属间化合物包括 Fe-Al 金属间化合物、Ti-Al 金属间化合物、Ni-Al 金属间化合物等,它们已在很多领域中得以应用。

(10) 纳米金属材料 纳米金属材料的概念是由德国科学家 H Gleiter 于 20 世纪 80 年代首次提出的。纳米材料因其特异的性能引起了科学界极大的关注。纳米金属泛指颗粒直径小于 100 nm 的金属材料,大于 100 nm 的金属颗粒称为粉末,小于 2 nm 的金属颗粒则称为原子簇,纳米金属颗粒具有一些明显不同于块状金属和一般粉末金属的属性,这主要是由其表面效应与体积效应所决定的。纳米金属颗粒有许多奇异的性能,如所有超细金属颗粒外观呈黑色(能完全吸收电磁波),熔点比块状金属低很多(20 nm 的镍粉烧结温度可从 700 °C 降到 200 °C),强度大幅度提高(铁纳米金属材料的断裂强度可提高 10 倍),低温下无热阻,导热性良好,有超导性,有较大的表面能(有利各种活化反应)等。正是存在上述优点,纳米金属材料在电子工业、原子能工业、航空航天工业、化学工业、生物医药等方面具有广泛的用途。但是,由于纳米金属颗粒制备方法生产率低、成本高,纳米金属颗粒易氧化、易团聚、易自然和易爆炸等,故纳米金属颗粒在分散、

存储、运输等方面仍存在不少问题有待研究。

纳米金属材料按照材料的形态可分为颗粒型材料、固体材料、颗粒膜(薄膜)材料、复合材料等。

(11) 形状记忆合金 具有形状记忆效应(shape memory effect, SME)的合金叫形状记忆合金,是指具有在一定条件下虽经变形但仍能恢复到变形前形状能力的合金材料。形状记忆合金最早是由美国人(T A Read 等)在 1951 年从金-镉合金中发现的。形状记忆效应是利用了马氏体相变与其逆转变的特性,即高温下将处理成一定形状的合金急冷下来,再在低温下经塑性变形成另一种形状,然后加热到一定温度时通过马氏体相变恢复到低温变形前的形状(这种马氏体相变必须是可逆的热弹性马氏体相变)。目前,最有实用化前景的形状记忆合金是 Ni-Ti 系形状记忆合金,最典型的应用实例是美国 F14 飞机油路连接系统的 Ni-Ti 形状记忆合金管接头。此外,铁系形状记忆合金、铜系形状记忆合金等一批新材料也得以快速发展,其不仅适用于航空航天、核工业及海底输油管线等危险场合和军事检修方面,而且在火灾报警器、液化气泄漏探测器、医疗器械、工业传感器等方面都具有广泛的应用前景。

(12) 能源转换与储氢材料 由于石油、煤等传统能源的储量是有限的,而且大量使用会对自然环境造成很大破坏,因此新能源的开发利用成为人类可持续发展战略的重要组成部分。新能源也叫一次能源,是指太阳能、风能、地热、潮汐等,这些能源通常不能直接使用,也不能储存,重要的问题是必须将它们转换成可使用的二次能源形式。而能源转换与储氢材料可以很好地解决该问题。其中,氢因以水为原料、燃烧后无污染而备受重视。目前已发现的储氢材料很多,包括碳纳米管、储氢合金等。其中,储氢合金是最早发现的储氢材料之一。

储氢合金的吸氢特性是美国布鲁海文国家实验室于 1968 年在镁-镍合金中发现的。此后在钐钴合金、镧镍合金中也发现了良好的吸氢性能,尤其是 LaNi₅ 合金在室温下具有良好的可逆吸放氢性能,使储氢合金作为一种储能材料成为可能。储氢原理如下:某些过渡族金属、合金和金属间化合物由于特殊的晶体结构,使氢原子容易进入其晶格的间隙并形成金属氢化物,但氢与这些金属的结合力很弱,而这些金属氢化物的储氢量很大,可以储存比其本身大 1 000 ~ 1 300 倍的氢,在加热时氢就能从金属中释放出来从而起到储氢的作用。利用储氢合金储存氢气,既轻便又安全,不仅没有爆炸的危险,而且还有储存时间长、无损耗、无污染等优点。目前储氢合金包括镁系储氢合金、稀土储氢合金、钛系储氢合金、锆系储氢合金、铁系储氢合金。储氢合金除可用于储存氢气外,还可以利用它达到储热或制冷的目的,另外,利用其高活性,在化学工业中用作催化剂。

(13) 薄膜材料 薄膜(thin film)材料是材料的一种特殊形态。固体薄膜的厚度一般在零点几纳米到几十纳米之间,在这样的厚度下材料会显示出与常规块体材料不同的特殊性能,而微(纳)电子工业的高速发展对膜材料产生了广泛的需求,反过来新性能、高性能薄膜材料的开发与应用也直接促进了通信、信息等高技术的飞速发展。

0.1.2 无机非金属材料(陶瓷)的发展

陶瓷有两种不同的定义。广义上讲,陶瓷是指一切经高温处理而获得的无机非金属材料。除先进(特种)陶瓷外,还包括陶器、瓷器、玻璃、水泥和耐火材料等。从狭义上讲,用无机非金属化合物粉体经高温烧结而成的,以多晶聚积体为主的固态物被称为陶瓷,显然该定义不含玻璃、