



全国本科院校机械类**创新型**应用人才培养规划教材

机械工程材料

主编 张铁军



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材

机械工程材料



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书根据教育部最新颁布的《机械工程材料课程、工程材料及机械制造基础系列课程教学改革指南》的精神编写,在内容和体系上作出了较大的更新。

本书共 11 章,分别介绍了钢铁材料及其热处理、铸铁与铸钢、有色金属、高分子材料、陶瓷材料及复合材料等,每章都设有教学目标、教学要求、引例、特别提示、知识链接、小结、习题,以便读者复习和总结、巩固已学的知识。本书阐述了机械工程材料的结构、组织、性能及其影响因素等机械工程材料的基本理论和基本规律;讨论了机械零件的失效与选材等内容;在此基础上较全面地介绍了金属材料、高分子材料、陶瓷材料、复合材料等常用机械工程材料的研发新成果和新发展,便于读者把握机械工程材料的发展趋势。

本书适合作为机械类专业基础课程的教材,主要面向高等工科院校机械工程、机械设计及其自动化、工业工程、材料成型及控制工程、材料工程等专业,也可作为工科非机械类专业教材,还可作为相关工程技术人员和工厂管理人员的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料/张铁军主编. —北京:北京大学出版社, 2011. 2

(全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-18522-3

I. ①机…II. ①张…III. ①机械制造材料—高等学校—教材 IV. ①TH 14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 014308 号

书 名: 机械工程材料

著作责任者: 张铁军 主编

责任编辑: 郭穗娟

标准书号: ISBN 978-7-301-18522-3/TH·0232

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 邮编: 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印刷者: 北京富生印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.75 印张 彩插 4 页 438 千字

2011 年 2 月第 1 版 2011 年 2 月第 1 次印刷

定 价: 36.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

“机械工程材料”是高等学校机械类和近机械类各专业的技术基础课，该课程的目的是结合时代特征——材料-资源-环境的可持续发展，系统地阐述机械工程材料的结构、组织与性能的基本理论和基本规律。本书以金属材料为重点，同时介绍了高分子材料、陶瓷材料、复合材料以及新型功能材料的基本原理、基本知识及其现代工程应用；在此基础上根据零件使用条件和性能要求，对零件选材及工艺路线的制定进行了阐述。此外，对各种工程材料牌号均应用了最新的国家标准；在每章中都安排有教学目标和教学要求，以便帮助读者理解、掌握教学内容。

为配合烟台大学的机械工程材料课程网络教学平台建设工程，本书先概述材料资源、环境及可持续发展的关系，以材料—结构—性能为主线。本书适合作为高等工科院校机械类和近机械类专业教材，还可作为相关工程技术人员和工厂管理人员的参考读物。

编者结合自身教学实践，将机械工程材料及其应用适当分层编写，并增编了案例，做到既有理论又有实践，通俗易懂，便于教师的教学和学生的学习，有助于促进教学质量的提高。

本书由烟台大学机电汽车工程学院张铁军担任主编，哈尔滨工业大学工程培训中心杨静、中国人民解放军海军航空工程学院孔丽和黑龙江工程学院王春艳担任副主编，清华大学机械工程系刘元和烟台大学机电汽车工程学院韩立春担任主审。编写分工如下：张铁军编写绪论、第1章工程材料的分类与键合方式和第7章铸铁和铸钢，杨静编写第2章工程材料的基础性能，烟台大学姜娉娉、葛振亮和张铁军编写第3章材料的凝固与铁碳合金相图和第5章热处理，烟台大学姜海荣编写第4章金属的塑性变形与再结晶，孔丽编写第6章工业用钢，北京交通大学鲍培伟编写第8章有色金属及其合金，黑龙江工程学院王国星和张铁军编写第9章高分子材料、陶瓷材料与复合材料，黑龙江工程学院王春艳编写第10章新材料简介，甘肃农业大学孙步功编写第11章零件的失效与选材。山东上汽汽车变速器有限公司的张力芹参与了第5章热处理的部分编写工作，中国科学院沈阳自动化所的莱佑彬、南京理工大学机电学院的许峰、肖培春和张道于参与部分编写。

本书在编写和出版过程中，得到许多专家和同仁的大力支持和帮助，也得到北京大学出版社的大力支持，在此谨向他们表示衷心的感谢！

由于编者的水平和经验有限，书中的不足之处，敬请广大读者和同行批评指正。

编 者

2010年10月

目 录

绪论	1	2.2.3 断裂韧性	42
0.1 材料的发展对人类文明进步的 贡献	1	2.3 材料的高、低温力学性能	43
0.2 材料、资源与环境的循环以及生命 周期评价	3	2.3.1 高温力学性能	43
0.3 金属材料的制备	5	2.3.2 低温力学性能	44
0.3.1 炼铁	5	2.4 材料的物理和化学性能	45
0.3.2 炼钢	6	2.4.1 材料的物理性能	45
0.4 学习本课程的重要意义	9	2.4.2 材料的化学性能	46
0.5 本课程的性质、任务及学习方法 ..	10	2.5 材料的工艺性能	47
习题	11	2.6 工程材料的主要性能的比较	48
第1章 工程材料的分类与键合方式	12	小结	49
1.1 工程材料的分类	13	习题	50
1.1.1 金属材料	13	第3章 材料的凝固与铁碳合金相图	52
1.1.2 陶瓷材料	13	3.1 二元合金的结晶	53
1.1.3 高分子材料	13	3.1.1 凝固与结晶	53
1.1.4 复合材料	14	3.1.2 晶粒大小及控制方法	55
1.2 材料的键合方式	14	3.1.3 金属铸态组织的形成及其 性能	56
1.3 金属的晶体结构	16	3.1.4 铸锭的缺陷	58
1.3.1 晶体与非晶体	16	3.2 二元合金相图	59
1.3.2 晶格与晶胞	16	3.2.1 二元合金相图的建立	59
1.3.3 晶面和晶向表示法	17	3.2.2 相组成分析与杠杆定律	60
1.3.4 三种常见的金属晶格 类型	18	3.2.3 二元合金相图的基本 类型	61
1.3.5 合金的晶体结构	20	3.3 合金的性能与相图的关系	66
1.3.6 实际金属中的晶体缺陷	22	3.4 铁碳合金的结晶	68
1.4 合金的相结构	25	3.4.1 纯铁的组织 and 性能	68
小结	28	3.4.2 铁碳合金中的组成物	69
习题	28	3.4.3 Fe-Fe ₃ C 相图分析及 应用	71
第2章 工程材料的基础性能	30	小结	82
2.1 静载时材料的力学性能	31	习题	82
2.2 材料的动载力学性能	38	第4章 金属的塑性变形与再结晶	84
2.2.1 冲击韧度	39	4.1 金属的塑性变形	84
2.2.2 疲劳强度	40	4.1.1 单晶体金属的塑性变形	85
		4.1.2 多晶体金属塑性变形	88

4.1.3 合金的塑性变形	89	6.3 结构钢	139
4.2 冷塑性变形对金属组织和性能的影响	90	6.3.1 碳素结构钢	139
4.2.1 塑性变形对金属组织结构的 影响	90	6.3.2 优质碳素结构钢	140
4.2.2 塑性变形对金属性能的影响	91	6.3.3 低合金高强度结构钢	142
4.2.3 残余应力	92	6.3.4 渗碳钢	146
4.3 冷塑性变形后金属在加热时组织和 性能的变化	92	6.3.5 调质钢	148
4.4 金属的热加工	95	6.3.6 弹簧钢	151
小结	97	6.3.7 滚动轴承钢	152
习题	97	6.3.8 易切削钢	154
第5章 热处理	99	6.3.9 超高强度钢	154
5.1 概述	100	6.4 工具钢	155
5.2 钢在加热时的转变	101	6.4.1 碳素工具钢	155
5.3 钢在冷却时的转变	103	6.4.2 量具刀具钢	156
5.4 钢的退火与正火	108	6.4.3 冷作模具钢	157
5.4.1 退火	108	6.4.4 热作模具钢	159
5.4.2 正火	109	6.4.5 耐冲击工具钢、无磁模具钢、 塑料模具钢	159
5.5 钢的淬火与回火	109	6.4.6 高速工具钢 (简称高速钢)	160
5.5.1 淬火	109	6.5 特殊性能钢	162
5.5.2 回火	114	6.5.1 不锈钢	162
5.6 钢的表面热处理	117	6.5.2 耐热钢	164
5.6.1 钢的表面淬火	118	6.5.3 耐磨钢	166
5.6.2 钢的化学热处理	120	小结	167
5.7 钢的特种热处理	123	习题	167
5.7.1 形变热处理	123	第7章 铸铁与铸钢	169
5.7.2 真空热处理	125	7.1 概述	170
5.7.3 热喷涂技术	125	7.1.1 铸铁的石墨化过程	171
5.7.4 气相沉积技术	126	7.1.2 铸铁的分类与特点	172
5.7.5 激光表面改性	127	7.2 灰铸铁	173
小结	128	7.3 球墨铸铁	174
习题	128	7.4 蠕墨铸铁	178
第6章 工业用钢	131	7.5 可锻铸铁	180
6.1 钢的分类与编号	133	7.6 铸钢	182
6.1.1 钢的分类	133	7.6.1 铸钢的分类与编号	182
6.1.2 钢的编号	134	7.6.2 铸钢的化学成分与力学 性能	182
6.2 钢中常存杂质与合金元素	136	7.6.3 铸钢的组织与热处理	183
6.2.1 钢中常存杂质元素对钢 性能的影响	136	小结	184
6.2.2 合金元素在钢中的作用	137	习题	184
		第8章 有色金属及其合金	186
		8.1 概述	187
		8.2 铝及铝合金	187

8.2.1 变形铝合金	188	习题	245
8.2.2 铸造铝合金	193	第 10 章 新材料简介	247
8.3 铜及铜合金	195	10.1 减振合金	248
8.3.1 概述	195	10.1.1 减振合金的类型及其 机理	248
8.3.2 黄铜	196	10.1.2 减振合金的应用和发展	250
8.3.3 青铜	198	10.2 记忆合金	250
8.3.4 白铜	201	10.2.1 记忆合金简介	251
8.4 镁及镁合金	201	10.2.2 记忆合金的应用	251
8.4.1 概述	201	10.3 磁性材料	252
8.4.2 无铅镁合金	205	10.3.1 磁性材料的分类及其 应用	253
8.4.3 含铅镁合金	206	10.3.2 磁性材料的基本特性	255
8.5 钛及钛合金	207	10.4 超导材料	256
8.5.1 概述	207	10.4.1 超导材料特性	257
8.5.2 钛合金的性能特点	207	10.4.2 超导材料基本临界 参量	257
8.5.3 钛合金	208	10.4.3 超导材料分类	258
8.5.4 钛合金的应用与发展	210	10.4.4 超导材料应用	258
8.6 轴承合金	210	10.5 纳米材料	259
8.6.1 锡基轴承合金	211	10.5.1 纳米材料简介	259
8.6.2 铅基轴承合金	212	10.5.2 纳米材料的特性	260
8.6.3 其他轴承合金	213	10.5.3 纳米材料的分类	261
8.7 其他有色金属及其合金	214	10.5.4 纳米材料的应用	262
8.7.1 锌基合金	214	10.5.5 纳米结构材料	262
8.7.2 镍基合金	215	10.5.6 纳米仿生材料	263
小结	215	10.5.7 纳米技术在国内的研究 情况及取得的成果	264
习题	216	小结	265
第 9 章 高分子材料、陶瓷材料与复合 材料	218	习题	265
9.1 高分子材料	219	第 11 章 零件的失效与选材	267
9.1.1 工程塑料	219	11.1 零件的失效形式	268
9.1.2 橡胶	227	11.1.1 失效概念	268
9.2 陶瓷材料	232	11.1.2 失效形式	268
9.2.1 陶瓷的分类	232	11.1.3 失效原因	269
9.2.2 陶瓷的组织结构	233	11.1.4 安装与使用	270
9.2.3 陶瓷的性能	233	11.2 工程材料的选用原则	276
9.2.4 常用的特种陶瓷	233	11.2.1 使用性能原则	276
9.3 复合材料	235	11.2.2 工艺性能原则	280
9.3.1 复合材料概述	236	11.2.3 经济性原则	283
9.3.2 常用的复合材料	240		
9.3.3 复合材料的发展与应用	241		
小结	244		

11.2.4	生命周期环境资源原则 ...	283	小结	289
11.3	典型零件的选材与工艺分析	284	习题	290
11.3.1	齿轮类零件的选材	284	参考文献	291
11.3.2	轴类零件的选材	286		

绪 论



引例

空中客车 A380 (Airbus A380) 是欧洲空中客车工业公司研制生产的四发动机超大型远程宽体客机, 有“空中巨无霸”之称。其可载乘客人数为 853 人; 在典型三舱等 (头等舱—商务舱—经济舱) 布局下可承载 525 名乘客。它在投入服务后, 打破波音 747 在远程超大型宽体客机领域统领 35 年的纪录, 结束了波音 747 在市场上 30 年的垄断地位, 成为载客量最大的民用客机。

其机体结构材料中铝合金、钛合金、合金钢、复合材料及其他材料所占的比例分别为 61%、10%、10%、25% 及 4%。它在更大范围内采用了更多的复合材料, 仅碳纤维复合材料的用量就达 32 t, 占结构总重的 15%。A380 是首架每乘客 (座) / 百公里油耗与一辆经济型家用汽车油耗相等的远程飞机。

在使用复合材料方面, A380 在研制中使用了创新的 GLARE 材料 (玻璃纤维增强铝材料), 与传统铝材料相比, 重量轻、强度高、抗疲劳特性好, 维修性能和使用寿命也得到大大改善, 不需要特别的加工工艺。飞机约 25% 由高级减重材料制造, 其中 22% 为碳纤维混合型增强塑料 (CFRP), 3% 为首次用于民用飞机的 GLARE 纤维-金属板。A380 首次采用了复合材料碳纤维制成的连接机翼与机身的中央翼盒。此外, A380 还首次在后压力舱后部的后机身采用了复合材料。

2007 年 7 月 8 日下线的波音 787, 其机体结构材料中复合材料、铝合金、钛合金、合金钢及其他材料所占的比例则分别为 50%、20%、15%、10% 及 5%。

0.1 材料的发展对人类文明进步的贡献

材料是可为人类接受的经济地制造有用器件的物质, 是人类赖以生存和发展的重要物质基础。从日常生活用的器具到高技术产品, 从简单的手工工具到复杂的航天器、机器人, 都是用各种材料制作而成或由其加工的零件组装而成。目前, 新材料、信息和生物技术已成为最重要、最具发展潜力的领域。材料无所不在, 无处不有, 它与人类及其赖以生存的社会、环境存在着紧密而有机的联系。

自古以来, 材料的发展水平和利用程度是人类文明进步的标志。人类历史也是按制造生产工具所用材料的种类划分的, 由史前时期的石器时代, 经过青铜器时代、铁器时代, 而今跨入陶瓷时代、高分子材料时代及人工合成材料的时代。每当一种新材料出现并得以利用, 都会给社会生产与人类生活带来巨大的变化。人类发展的历史证明, 材料是人类文明进步的里程碑。

早在 100 万年前, 人类就开始以石头做工具, 标志着人类进入旧石器时代。一万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, 从而标志着人类进入新石器时代。同期, 人类开始用毛皮遮身, 能识别天然金和铜; 中华民族的祖先在 8000 年前就开始用蚕丝做衣服; 印度人在 4500 年前开始种棉花时, 中国就能用黏土烧制陶器, 到东汉时期又出现了瓷器, 并流传海外。人类在找寻石料的过程中认识了矿石, 在烧制陶器的过

程中还原出金属铜和锡，创造出炼铜技术，生产出各种青铜器物，从而进入青铜器时代，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。我国在殷、商时期，青铜冶炼和铸造技术已达到很高水平。河南安阳出土的司母戊大方鼎质量达 87.5 kg，且饰纹优美。从湖北江陵楚墓中发掘出的两把越王勾践的宝剑，长 55.6 cm，至今锋利异常，是我国青铜器的杰作。

5000 年前，人类开始使用铁。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，在公元前 10 世纪，铁工具比青铜工具更为普遍，人类从此进入铁器时代，一直延续到现在。公元前 8 世纪已出现用铁犁、锄等农具，使生产力提高到一个新水平。我国从春秋战国时期便开始大量使用铁器，冶铁技术有很大突破，遥遥领先于世界其他地区，如利用生铁经过退火制造韧性铸铁以及生铁制钢技术的发明，标志着中国生产能力的重大进步，这成为促进中华民族统一和发展的重要因素之一。从战国至汉代这些技术相继流传到朝鲜、日本、西亚和欧洲地区，推动了世界文明的发展。

到了近代，18 世纪蒸汽机的发明，使材料在新品种开发和规模生产等方面发生了质的飞跃。如 1856 年和 1864 年先后发明了转炉和平炉炼钢，使世界钢产量从 1850 年的 6 万吨突增到 1900 年的 2800 万吨，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也相继出现，这些都是现代文明的标志。此后，铜、铅、锌也得到大量应用，而后铝、镁、钛等金属相继问世，因此金属材料在 20 世纪中占据了材料的主导地位。

20 世纪初期，人工合成高分子材料问世，到 20 世纪 60 年代以后，为适应各行业的需求，以及美苏冷战、空间技术等需求，特种高分子材料、功能高分子生物学高分子、工程塑料、特种涂料、航天航空材料、复合材料高分子合金理论和实践上都取得了很多成就，聚合理论、聚合方法、测试手段、应用技术，从工艺到工程都取得了惊人的进展。如今世界高分子材料年产量在 1 亿吨以上，论体积已超过钢。在美国高分子材料的体积已是钢的两倍，因此有人称现在是高分子时代；20 世纪中叶，通过合成化工原料或特殊制备方法制造出一系列的先进陶瓷。由于其资源丰富、密度小、耐高温等特点，成为近三四十年来研究的重点，而且用途不断扩大，有人甚至认为“新陶瓷时代”也来到了。随着科学技术的发展，功能材料越来越重要，特别是半导体材料出现后，促进了现代文明的加速发展。从晶体管到集成电路，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，激光材料和光导纤维的涌现，使人类社会进入了“信息时代”，材料的发展进入了丰富多彩的新时代。

现代文明的另一个标志是航空航天技术的发展。由于战争的需要，20 世纪 40 年代出现了喷气技术。该技术的出现是以耐高温材料及高性能结构材料为依托，特别是耐高温合金和钛合金的发展，不断提高了歼击机的性能，而且为今天的大型客机的安全性能及有效载荷的提高、持续航行时间的延长及机体与发动机的长寿命提供了保障。作为航空航天用的材料，其比强度、比刚度尤为重要。因为飞机发动机每减 1kg，就可使飞机减 4kg；航天飞行器每减 1kg，就可使运载火箭减轻 500kg，所以对高速飞行器来说，要尽可能减轻质量。新开发出的高强度芳纶纤维，其比强度比高强度钢高出近 100 倍。比刚度对于飞行器也十分关键，高比刚度材料在相同受力条件下变形量小，从而保证了原设计的气动性能。这就是为什么要大力发展纤维增强的树脂基及金属基复合材料的重要原因。

新中国成立后，先后建立了鞍钢、宝钢等大型钢铁基地，全国 1949 年的钢产量为

15.8万吨,占世界钢产量的0.1%,只相当于现在全国半天的产量。1996年我国钢产量突破1亿吨,成为世界第一产钢大国,近几年的产量维持在5亿多吨,已连续14年为世界第一产钢大国。原子弹、氢弹的爆炸,神舟七号载人飞船的上天、青藏铁路及高速铁路的建成通车、南极科考等都说明了我国在材料的开发、研究及应用等方面有了飞跃性的发展,达到了较高的水平。

总之,材料与现代化及现代文明的关系十分密切,为提高人民生活、增加国家安全、提高工业生产率与加快经济增长提供了物质基础。

0.2 材料、资源与环境的循环以及生命周期评价

材料已被公认是人类的基本资源之一,长期以来,人们形成了传统思维或传统产业的“资源开发—生产加工—冶金等初级加工—消费使用—废物丢弃”材料循环模式。如图0.1所示,人类在地球上通过采矿、钻探、挖掘、采集等得到原材料,这些原材料(矿石、矿物、煤、原油、天然气、砂子、木材、生橡胶等)通过冶炼及初级加工被加工成工业用原料(金属、化学产品、纤维、橡胶、电子晶体等),然后进一步加工成工程材料(合金、玻璃或陶瓷、半导体、塑料、合成橡胶、混凝土、建筑材料、纸、复合材料等)。这些工程材料通过相应设计进行加工制造,组成构件、机器、装置和其他社会需要的产品,如汽车等,为人类所使用。当这些由工程材料制成的产品被人类使用后,或因服役后失效,或到了工程要求的服役期,或完成了某一特定使用要求后,人们通常称为废品,这些废物作为废料,又回到大地上。上述循环涉及化工、冶金、能源、材料、环境等多各学科、多个工业部门。而且与材料相关的产业既是资源消耗大户,也是能源消耗大户,又是环境污染的主要来源。随着这些工业的飞速发展,在不断促进人类生产和生活水平提高的同时,也越来越严重地造成了对环境的污染,同时,也导致许多金属的资源日趋枯竭。据调查,即使全世界已探明的资源储量再增加10倍,而且50%可再生,可维持的时间也不是很长,更何况能达到50%再生的材料也不多。

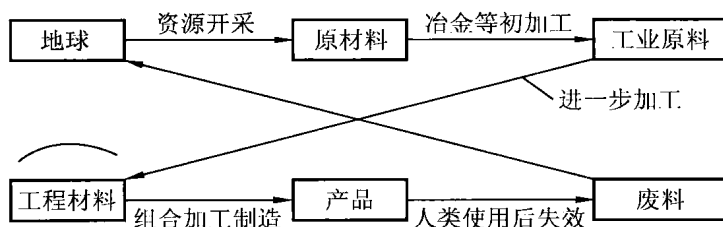


图 0.1 材料单向循环模式

审视这种单一循环发展模式,人们开始认识到这种单一循环模式追求的是以最大限度地发挥材料的性能和功能为出发点的,而对资源、环境问题没有足够重视,没有充分考虑材料的环境协调性,已无法持续,取而代之的是以仿效自然生态物质循环过程的模式,在倡导全球经济可持续发展的今天,对材料内涵的理解和认识还应拓宽,主要有以下三方面:

在尽可能满足用户对材料性能的要求同时,必须节约资源与能源,尽可能减少对环境的污染,改变片面追求性能的观点。

在研究、设计、制备材料以及使用、废弃材料产品时，一定要将材料及其产品在整个生命周期内对环境的影响作为重要评价指标，改变只管设计生产，不顾使用和废弃后资源再利用及环境污染的观点。

对材料内涵理解的拓宽将涉及多学科的交叉，不仅是理工交叉，且具有更宽的知识基础和更强的实践性，不但要讲科学技术效益、经济效益；还要讲社会效益，最终把材料科技与产业的具体发展目标和各国、各地区可持续发展的大目标结合起来。

材料的可持续发展战略是一个多学科、多部门联合作用的复杂系统工程，最重要的思想就是建立“生态工业园区”。所谓“生态工业园区”就是实施生态工业的系统工程基础，其目标是通过多种产业的综合协调发展，使某一个产业的副产物或废料成为另一个企业的原料加以利用，进而形成物流的“生态产业链”或“生态产业网”，能形成多次梯级利用，并在一定界区内的多行业、多产品联合发展，不仅可使资源在产业链中得到充分或循环利用，而且使能量资源和信息资源同时得到充分利用。

在生态工业园区规划的过程中，会发现许多“网”、“链”的断点，这就为以后深入的实验研究和工业开发指明了方向。这种不断循环，不断深入研究，不断深入开发、应用，向着生态过程工业和可持续发展逐渐靠近，最终每一个环节和每一个单元都将是清洁的，用环境友好的生产工艺取代污染工艺，以实现良性循环的可持续发展的目标。

美国麻省理工学院在全美首先开设了生态工业学的课程，设立了跨院系的研究项目，致力于生态工业可持续发展的研究，并组织相关领域的各种定期和不定期会议，以促进学术界、政府、公司之间合作网络的建立；其他国家也相继开展了生态环境材料的应用研究。

各国都对材料产业环境协调发展给予了高度重视。日本的山本良一教授等撰写了环境材料方面的专著，首先系统介绍了环境材料的基本观点和研究的基本方法。德国人提出了“四倍因子理论：半份消耗，倍数产出”，其意思是在经济活动和生产过程中通过采取各种措施，将资源消耗降低一半，同时将生产效率提高一倍，由此在同样资源消耗的水平上，得到了四倍的产出。四倍因子理论的提出，得到了世界上许多政治家、经济学家、社会学家、生态学家、环境科学家以及许多其他学者的赞同，被认为对有效利用资源、改善生态环境、实现社会和经济的可持续发展具有战略意义。我国在国家 863 计划的支持下，开始对钢铁、铝、水泥、塑料、建筑涂料、陶瓷等，量大面广的几大类主要基础材料进行了初步的全寿命周期评价 LCA。

🔑 特别提示

世界天然金属矿物资源呈现枯竭之势，如表 0-1 所示，重要金属的储量情况。因此不能漠视资源的浪费，合理而有效的使用资源可以缓解资源枯竭的到来。

表 0-1 世界天然的重要金属储量情况

金属种类	储量/10 ⁶ t	尚可使用年限	再生率/%	金属种类	储量/10 ⁶ t	尚可使用年限	再生率/%
Fe	1×10 ⁹	109	31.7	Mo	5.4	36	41.0
Al	1170	35	16.9	Ag	0.2	14	
Cu	308	24	40.9	Cr	775	112	
Zn	123	18	21.2	Ti	147	51	
Mg		1000		Pb		30	

0.3 金属材料的制备

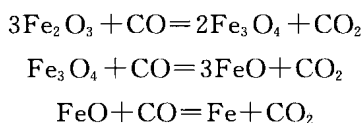
下面对工程材料领域常用的钢铁材料的提取、制备过程进行简要介绍。

0.3.1 炼铁

炼铁的主要原料是铁矿石，它是由铁的氧化物和含 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 等成分的脉石构成，它的主要作用就是提供铁元素。冶炼前铁矿石经选矿筛分后，破碎磨成粉料，然后烧结成块备用。另外，还有焦炭和石灰石。焦炭在高炉中的作用一是提供热源，二是作为还原剂把铁和其他元素从矿石中分离出来。石灰石的作用是在高炉内受热分解形成 CaO 和 MgO ，它们在炉温达到 $1100\sim 1200^\circ\text{C}$ 时，与矿石中的杂质和焦炭中的灰分 (SiO_2 、 Al_2O_3) 结合，形成低熔点、密度低的硅酸盐熔渣浮在铁液表面，以便顺利排除。

炼铁是在高炉中进行的，高炉炉体是由耐火材料砌成的，外面包围着钢板的圆截面炉子，如图 0.2 所示。为了使铁矿石在炉内充分还原，炉子高度可达几十米。高炉底部和炉腹被焦炭充填，炉身中装有层层相间的铁矿石、焦炭和石灰石。冶炼过程中，炉底焦炭燃烧产生的高温炉气向上运动，将热量传递给炉料，经过一系列的物理化学过程，形成铁液和炉渣滴入炉缸。每隔 $3\sim 4\text{h}$ 放一次铁液，每隔 $1\sim 1.5\text{h}$ 放一次炉渣。高炉一旦投入生产，就日夜不停地工作，一般可持续运行十年以上才停炉大修一次。

自然界中铁都是以化合物形式存在于铁矿石中，炼铁的实质是在高炉中将铁矿石中的铁还原；将氧化物、磷酸盐、焦炭和矿石中的 Mg 、 Si 、 P 、 S 还原，并与碳一起溶于铁液中的一系列物理化学过程。焦炭在高温热风的助燃下，迅速产生大量的热量，燃烧不充分，形成大量的 CO ，这是炼铁的主要还原剂，扩散能力强，大大提高还原效果，其主要还原反应如下：



同时，其他非铁元素 Mn 、 Si 、 P 、 S 等也分别从它们的化合物中被还原，并与碳一起溶于铁中，故生铁中除了含有较高的碳外，常常还有一定数量的 Mn 、 Si 、 P 、 S 等，其中磷、硫一般情况下属于有害元素，应在冶炼时严格加以控制，因为它们的存在将增加钢铁材料的脆性。

高炉的产品主要是生铁，根据不同的使用要求，其产品有两类：一是炼钢生铁；二是铸造生铁。炉渣和煤气是高炉的副产品，炉渣成分与水泥类似，可用来制造水泥、渣砖、陶瓷等；高炉煤气可做燃料，用于炼焦、炼钢和热处理，具有较高的经济价值。

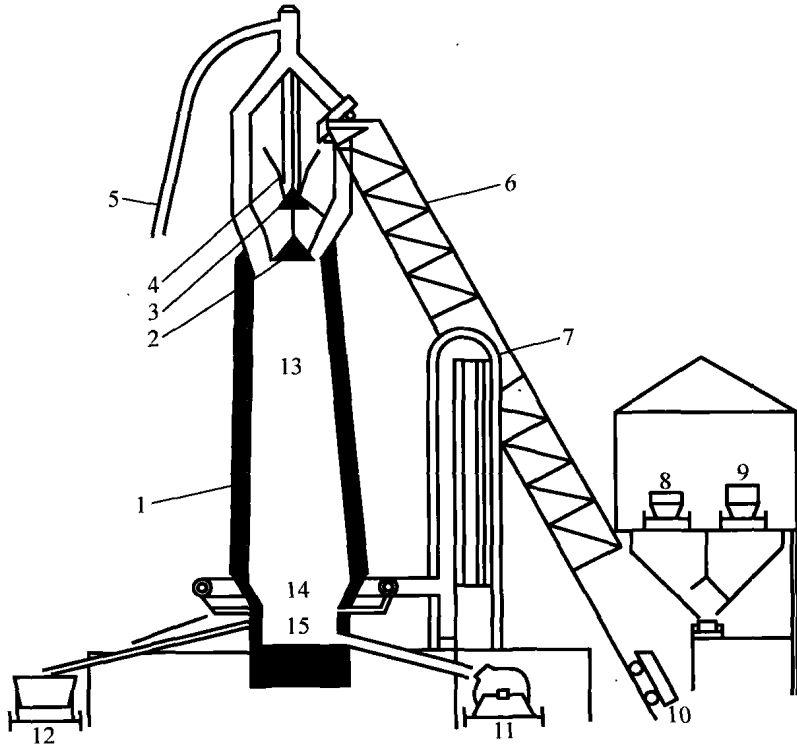


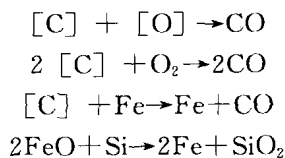
图 0.2 高炉设备示意图

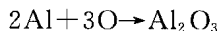
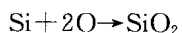
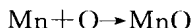
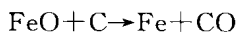
- 1—高炉 2—大料钟 3—小料钟 4—料斗 5—煤气排气管
- 6—加料装置 7—热风炉 8—焦炭车 9—矿石车 10—料斗
- 11—铁液包 12—盛渣桶 13—炉身 14—炉腹 15—炉缸

0.3.2 炼钢

炼钢的基本原料是生铁和废钢，根据不同工艺要求，还需加入各种金属料以及造渣剂等。钢与生铁的主要区别是含碳量不同，钢中碳的质量分数小于 2.11%，生铁碳的质量分数一般为 3.5%~4.5%。碳钢的成分以 Fe、C 元素为主，另外，还有少量的硅、锰、磷、硫、氢、氧、氮等非特意添加的杂质元素，它们来自炼钢时所添加的废钢、铁矿石、脱氧剂等，其中硫、磷是杂质元素，对钢的性能有不良影响，需在冶炼时加以控制，其他元素的含量则需要在炼钢时通过各种化学反应来调整，使成分最终达到技术要求。

任何一种炼钢方法，其原理都是将生铁中多余的碳和各种杂质元素通过有选择性的氧化、形成气体或炉渣等方式降低其含量。因此，炼钢是一个氧化过程。在 1500~1700℃ 高温下炼钢，首先是铁与氧反应生成氧化铁，然后氧化铁又与生铁中的碳、硅、磷、锰等元素发生氧化反应，将它们氧化，从而使铁被还原，反应后的产物以炉气或炉渣形式排出，最后获得符合成分要求的钢液。炼钢过程主要发生的反应如下：





1. 转炉炼钢

转炉因装料和出钢时需要倾转炉体而得名。转炉炼钢以生铁或铁水为主要原料，利用氧气将铁液中的杂质元素氧化。图 0.3 所示为目前广泛应用的氧气顶吹转炉示意图。冶炼过程主要分为三个阶段：

首先，按炉料比加入废钢、造渣原料，将炉子倾转至装铁液位置，倒入 1250~1400℃ 铁液。然后，摇正炉子降下氧枪吹炼，由于铁的浓度远远高于杂质浓度，故铁先氧化成氧化铁溶于炉渣，从而使铁液的氧含量大幅度增加，铁液中的碳、硅、锰、磷等先后被迅速氧化成 FeO、CO、SiO₂、MnO、P₂O₅，其含量相应降低；同时向炉内加入石灰等造渣材料，以便为脱硫、脱磷作准备。当钢液中的 P、S、Si、Mn、C 达到要求后即提前停止吹炼。再取样分析检测和测量炉温，待钢液温度符合要求后准备出钢。出钢前应进行脱氧处理，将残留在钢中的氧去除，常用的脱氧剂有硅铁、锰铁、铝等。对于合金钢而言，还要加入合金料进行合金化。转炉炼钢的特点是效率高，成本低、投资少、质量好。碳素钢和低合金钢大多采用转炉冶炼。钢中杂质、气体和非金属夹杂物的含量对钢的质量有极大的影响，由于顶吹转炉炼钢直接向熔池吹氧，空气不易进入熔池，故这种方法生产的钢中气体含量较低，适合于深冲、冷轧薄板、焊接钢管、无缝钢管的生产。

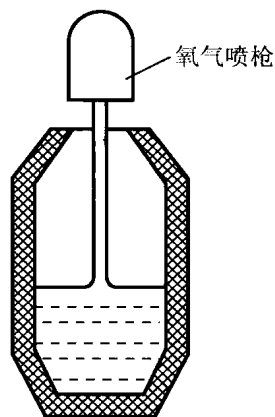


图 0.3 氧气顶吹转炉示意图

2. 电弧炉炼钢

电弧炉炼钢法主要利用电弧热，在电弧作用区，温度高达 4000℃。冶炼过程一般分为熔化期、氧化期和还原期，在炉内不仅能造成氧化气氛，还能造成还原气氛，因此脱磷、脱硫的效率很高。以废钢为原料的电炉炼钢，比高炉转炉法基建投资少，同时由于直接还原的发展，为电炉提供金属化球团代替大部分废钢，因此就大大地推动了电炉炼钢。电弧炉炼钢示意图如图 0.4 所示。世界上现有较大型的电炉约 1400 座，目前电炉正在向大型、超高功率以及电子计算机自动控制等方面发展，最大电炉容量为 400t。国外 150t 以上的电炉几乎都用于冶炼普通钢，许多国家电炉钢产量的 60%~80% 均为低碳钢。我国由于电力和废钢不足，目前主要用于冶炼优质钢和合金钢。

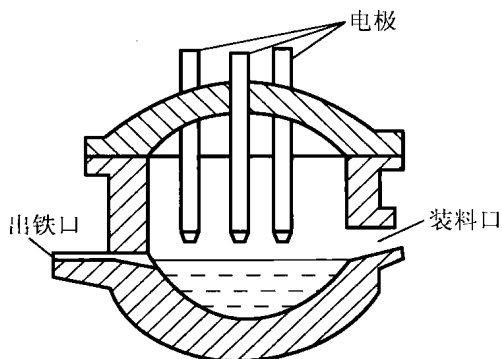


图 0.4 电弧炉炼钢示意图

3. 钢的浇注

将电炉或转炉中冶炼过的钢液倒入盛钢桶内，进行最后成分调整、脱氧和温度调整，或炉后精炼处理，再注入钢锭模中凝固成钢锭，或注入其他结晶器中铸成钢坯。浇注的任务是将钢液铸成表面良好和内部纯净、均匀、致密的固体钢锭或铸坯。铸锭是炼钢生产的重要组成部分，炼钢车间的产品是钢锭或铸坯，它的质量好坏不仅决定于炼钢，而且与浇注有关。从液态到固态的转变就是在铸锭过程中完成的。因此，浇注工艺对成品的优劣有决定性的影响。

划分浇注的方法有多种，主要可分为模铸与连铸。

(1) 模铸。模铸已有 100 多年的历史。模铸操作繁杂，生产效率低，劳动条件差，原材料消耗大，金属收得率低，钢锭内部和表面质量差。但模铸在生产上简单易行，并能适应钢种及规格繁多的需要，再加上近年来，采用快速浇注（上注线速度最高达米/分），增大钢锭重量（轧制钢锭重量达吨）和改进铸锭设备（如采用滑动水口）等措施，使铸锭生产能力成倍增加。采用合成渣保护浇注使钢锭质量显著改善，采用上小下大的钢锭模挂绝热板浇注镇静钢以及发展半镇静钢，使钢锭成材率和铸锭生产率进一步提高。故模铸仍然应用得很广泛。不过，随着我国钢铁工业的不断发展，连续铸钢法逐渐取代模铸法，已成为发展的必然趋势。

(2) 连铸。连铸即为连续铸钢（Continuous Steel Casting）的简称。在钢铁厂生产各类钢铁产品过程中，使用钢水凝固成型有两种方法：传统的模铸法和连续铸钢法。而在 20 世纪 50 年代在欧美国家出现的连铸技术是一项把钢水直接浇注成形的先进技术，如图 0.5 所示。与传统模铸法相比，连铸技术具有大幅提高金属收得率和铸坯质量，节约能源等显著优势。

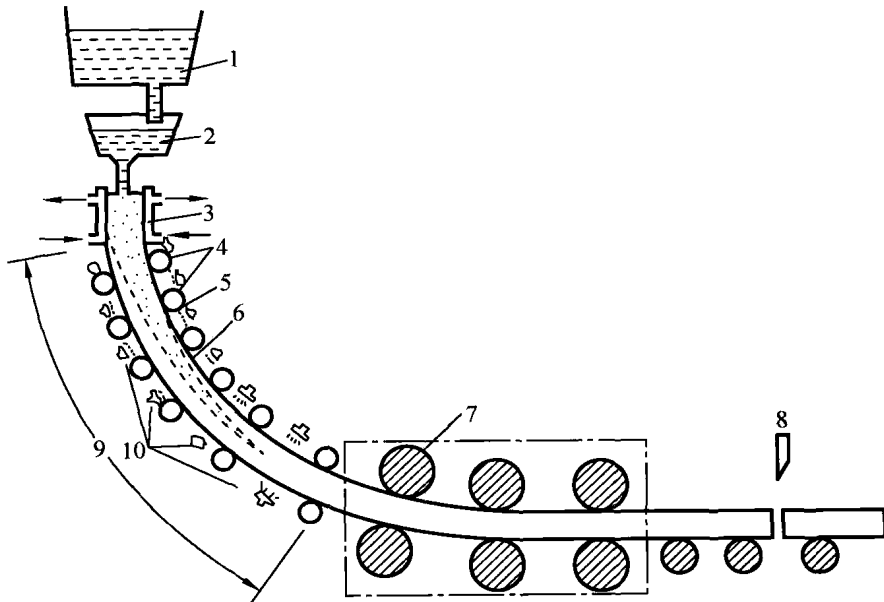


图 0.5 弧形连铸机工艺流程示意图

- 1—盛钢桶 2—中间包 3—结晶器 4—夹辊 5—液相区
6—铸坯 7—拉矫机 8—切割装置 9—二次冷却区 10—冷却水喷嘴

4. 轧制

金属（或非金属）材料在旋转轧辊的压力作用下，产生连续塑性变形，获得要求的截面形状并改变其性能的方法。将金属坯料通过一对旋转轧辊的间隙（各种形状）因受轧辊的压缩使材料截面减小，长度增加的压力加工方法，图 0.6 所示为三种主要轧制方式，这是生产钢材最常用的生产方式，主要用来生产型材、板材、管材，图 0.7 所示为经轧制可获得的各种形状截面的型材。轧制有热轧和冷轧两种。

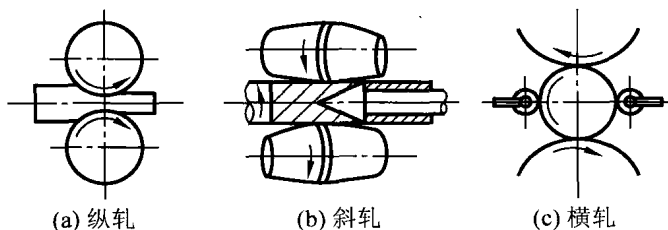


图 0.6 三种轧制方式

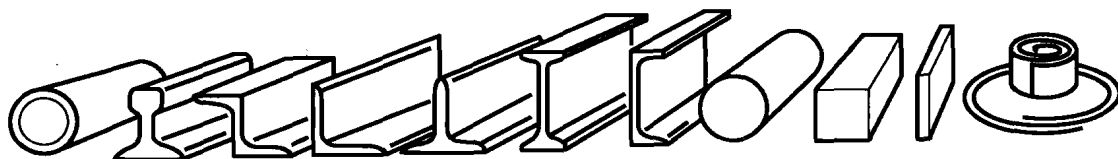


图 0.7 经轧制可获得的各种形状截面的型材

连铸连轧全称连续铸造连续轧制（Continue Casting Direct Rolling, CCDR），是把连铸和连轧两种工艺衔接在一起的钢铁轧制工艺，是把液态钢倒入连铸机中轧制出钢坯（称为连铸坯），然后不经冷却，在均热炉中保温一定时间后直接进入热连轧机组中轧制成型的钢铁轧制工艺。这种工艺巧妙地把铸造和轧制两种工艺结合起来，与传统的先铸造出钢坯后经加热炉加热再进行轧制的工艺相比，具有简化工艺、改善劳动条件、增加金属收得率、节约能源、提高连铸坯质量、便于实现机械化和自动化的优点。连铸连轧工艺现今只在轧制板材、带材中得到应用。

0.4 学习本课程的重要意义

机械工程材料与人类密切相关，材料是人类物质文明的基础。材料、信息、能源是现代文明的三大支柱，而材料又是一切发展和进步的前提。人类进入 21 世纪后开始认真思考材料、能源和环境的密切关系，越来越重视材料的可持续发展与生态环境材料的研究，怎样考虑材料科学与工程的发展思路，从单一循环方式向无公害、零排放的方向发展，从全方位全过程规划未来机械工程材料及相关产业是人们今后的着眼点。材料从各个分散的分支学科向着统一的大材料发展，这也是材料科学发展的必然。材料科学和材料工程密不可分。现代材料观最重要的思想就是把材料的成分、结构、合成与加工、性能、使用效能