

普通高等院校机电工程类规划教材

# 机械工程材料

王建民 主编

徐平国 高术振 副主编

普通高： 2016 教材

# 机械工程材料

王建民 主编  
徐平国 高术振 副主编

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书以材料的强化为主线,系统介绍了机械工程中常用的金属材料和非金属材料的基础知识。全书共分13章,其中第1章介绍了材料的分类与钢铁生产;第2章介绍了材料的组织结构与性能;第3~7章结合金属材料的基础知识分别介绍了固溶强化、细晶强化、第二相强化、形变强化、相变强化5种材料强化机制;第8~11章分别介绍机械工程中常用的钢材、铸铁、有色金属、非金属材料等基础知识及其应用;第12章为机械工程材料的选用;第13章针对课程的难点和重点设计了铁碳合金相图和钢的热处理2个综合训练,并安排了6个实验,供读者选做。

本书可作为高等工科院校机电工程类各专业本科生的教材,也可供相关技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料/王建国主编. —北京:清华大学出版社,2016

普通高等院校机电工程类规划教材

ISBN 978-7-302-43261-6

I. ①机… II. ①王… III. ①机械制造材料—高等学校—教材 IV. ①TH14

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第044184号

责任编辑:赵 斌 洪 英

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:17

字 数:411千字

版 次:2016年6月第1版

印 次:2016年6月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00元

产品编号:065261-01

# 前 言

人类为了生活得更好,满足衣、食、住、行的需要,其生活、生产过程就是将原材料转变为产品的过程,如棉花加工成布匹,粮食加工成食品,木材加工成桌椅,金属材料加工成机器。产品不同,所选择的原材料不同;同一种产品,也可能用不同的材料制作;不同的材料其成形方法也不同。工程材料是论述工程上常用材料的成分、组织结构、性能及应用的一门学科。

“机械工程材料”是一门技术基础课,是机械类、近机械类等专业的必修课。学习工程材料的目的是为了选择材料、用好材料,材料在性能方面有哪些特长,就应该发挥它的特长(如强度高、硬度高、塑性好、韧性好等)。材料的性能与成分有关,主要取决于材料内部的组织结构,不同的成分有不同的性能,同一成分的材料不同的组织结构也会有不同的性能,改变材料的内部组织结构,就会改变材料的性能。百炼改变了成分,千锤改变了组织结构,千锤百炼改变了材料的性能。因此,掌握了材料内部的组织结构也就知道了材料的性能。学习“机械工程材料”课程要建立起成分—组织结构—性能—应用这个循环,目的是为了应用,重点是组织结构。

纯金属作为结构材料,其性能特点是强度、硬度低,塑性、韧性好,制作机械零件强度、硬度不足,塑性、韧性有余。因此,强化是“机械工程材料”课程的主线,本书都是围绕如何强化纯金属来编写的,如固溶强化、细晶强化、形变强化、第二相强化、马氏体强化等。每一种强化方法都是为了改善材料内部的组织结构,从而改善材料的性能。要学好本课程就要弄清楚各种强化方法的本质区别和内在联系。抓住强化这根主线,抓住各种强化方法的本质是对组织结构的改变从而改善了性能这个特点,才能更好地选择材料和应用材料。

“机械工程材料”课程具有技术性、实践性强的特点,其内容与实际生产和生活密切相关,先有实践后有理论,基本概念多且抽象。要学好“机械工程材料”,要注重加强实践性教学环节,要做好实验、实习,要结合身边实例、生活实例、课本实例来学习。

本书由河北工程大学王建民教授主编,高术振任副主编,北京联合大学徐平国任副主编,参加编写的还有河北工程大学李河宗、吴弘、李丽。对本书编写做出贡献的还有河北工程大学牛兰芹、张建宇、刘照等。

本书由北京科技大学倪晓东、沈阳大学张钧主审,并提出了宝贵建议,在此表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请同行与读者批评指正。

编 者

2015 年 12 月

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第 1 章 材料的分类与钢铁生产       | 1  |
| 1.1 材料的分类              | 1  |
| 1.1.1 元素、物质、材料         | 1  |
| 1.1.2 材料的发展史           | 1  |
| 1.1.3 材料的分类            | 1  |
| 1.2 钢铁材料生产简介           | 4  |
| 1.2.1 炼铁               | 4  |
| 1.2.2 炼钢               | 5  |
| 1.2.3 钢材生产             | 7  |
| 思考题                    | 8  |
| 第 2 章 材料的组织结构与性能       | 9  |
| 2.1 材料的成分、组织结构与性能      | 9  |
| 2.1.1 材料的成分、组织结构与性能的关系 | 9  |
| 2.1.2 金属材料的性能          | 9  |
| 2.2 静态力学性能             | 10 |
| 2.2.1 金属材料的拉伸试验        | 10 |
| 2.2.2 金属材料的硬度试验        | 13 |
| 2.3 动态力学性能             | 17 |
| 2.3.1 冲击韧度             | 17 |
| 2.3.2 疲劳极限             | 18 |
| 2.3.3 材料的耐磨性能          | 19 |
| 2.4 断裂韧度               | 19 |
| 2.5 高、低温性能             | 21 |
| 2.5.1 高温性能             | 21 |
| 2.5.2 低温性能             | 21 |
| 2.6 纯金属的性能特点           | 21 |
| 思考题                    | 22 |
| 第 3 章 材料的微观结构与固溶强化     | 23 |
| 3.1 纯金属的结构             | 23 |
| 3.1.1 晶体、晶格、晶胞         | 23 |
| 3.1.2 3 种典型的金属晶体结构     | 24 |

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| 3.1.3 立方晶系的晶面和晶向表示方法 .....  | 26        |
| 3.2 纯金属的实际晶体结构 .....        | 28        |
| 3.2.1 单晶体与多晶体的基本概念 .....    | 28        |
| 3.2.2 晶体缺陷 .....            | 28        |
| 3.3 金属材料的强化思路与强化方法 .....    | 30        |
| 3.3.1 强化思路 .....            | 30        |
| 3.3.2 强化方法 .....            | 31        |
| 3.4 合金的晶体结构 .....           | 34        |
| 3.4.1 合金、组元、相 .....         | 34        |
| 3.4.2 合金的相结构 .....          | 34        |
| 思考题 .....                   | 37        |
| <b>第4章 金属的凝固与细晶强化 .....</b> | <b>38</b> |
| 4.1 物质的状态、凝固与结晶 .....       | 38        |
| 4.2 纯金属结晶的宏观现象及热力学分析 .....  | 39        |
| 4.2.1 纯金属结晶的宏观现象 .....      | 39        |
| 4.2.2 热力学分析 .....           | 40        |
| 4.3 纯金属结晶的微观过程 .....        | 40        |
| 4.3.1 形核 .....              | 41        |
| 4.3.2 长大 .....              | 43        |
| 4.4 晶粒大小及细晶强化 .....         | 44        |
| 4.4.1 晶粒大小对性能的影响 .....      | 44        |
| 4.4.2 晶粒度及其影响因素 .....       | 44        |
| 4.4.3 控制晶粒度的措施 .....        | 44        |
| 4.5 铸锭组织与缺陷 .....           | 46        |
| 4.5.1 铸锭的宏观组织 .....         | 46        |
| 4.5.2 铸锭结构的特性 .....         | 47        |
| 4.5.3 铸锭的缺陷 .....           | 47        |
| 4.6 金属的同素异晶转变 .....         | 48        |
| 4.7 合金的结晶 .....             | 49        |
| 4.7.1 相图、相变、相与组织 .....      | 49        |
| 4.7.2 二元合金相图的建立 .....       | 50        |
| 4.7.3 二元合金相图的基本类型 .....     | 50        |
| 思考题 .....                   | 58        |
| <b>第5章 铁碳合金与第二相强化 .....</b> | <b>60</b> |
| 5.1 铁碳合金的基本相 .....          | 60        |
| 5.2 铁碳合金相图 .....            | 61        |
| 5.2.1 铁碳合金相图分析 .....        | 61        |

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| 5.2.2 典型合金的结晶过程及其组织 .....     | 64        |
| 5.2.3 含碳量对铁碳合金组织和性能的影响 .....  | 70        |
| 5.2.4 铁碳相图的应用和局限性 .....       | 72        |
| 思考题 .....                     | 73        |
| <b>第6章 金属的塑性变形与形变强化 .....</b> | <b>74</b> |
| 6.1 金属的塑性变形 .....             | 74        |
| 6.1.1 单晶体金属的塑性变形 .....        | 74        |
| 6.1.2 多晶体金属的塑性变形 .....        | 78        |
| 6.2 冷塑性变形对组织和性能的影响 .....      | 79        |
| 6.2.1 加工硬化 .....              | 79        |
| 6.2.2 显微组织的变化 .....           | 80        |
| 6.2.3 织构现象的产生 .....           | 80        |
| 6.2.4 残余内应力 .....             | 82        |
| 6.3 回复与再结晶 .....              | 82        |
| 6.3.1 变形金属在加热时的组织和性能的变化 ..... | 82        |
| 6.3.2 金属的再结晶温度 .....          | 85        |
| 6.3.3 再结晶退火后的晶粒度 .....        | 86        |
| 6.4 金属的热加工 .....              | 86        |
| 6.4.1 热加工与冷加工的区别 .....        | 86        |
| 6.4.2 热加工对金属组织和性能的影响 .....    | 87        |
| 思考题 .....                     | 87        |
| <b>第7章 钢的热处理与相变强化 .....</b>   | <b>89</b> |
| 7.1 概述 .....                  | 89        |
| 7.2 钢在加热时的组织转变 .....          | 90        |
| 7.2.1 奥氏体的形成 .....            | 90        |
| 7.2.2 影响珠光体向奥氏体转变的因素 .....    | 91        |
| 7.2.3 奥氏体晶粒的长大及其影响因素 .....    | 92        |
| 7.3 钢在冷却时的组织转变 .....          | 93        |
| 7.3.1 过冷奥氏体等温转变图 .....        | 93        |
| 7.3.2 过冷奥氏体连续转变图 .....        | 103       |
| 7.4 钢的退火和正火 .....             | 104       |
| 7.4.1 退火和正火的目的 .....          | 104       |
| 7.4.2 退火和正火操作及其应用 .....       | 105       |
| 7.4.3 退火和正火的选择 .....          | 107       |
| 7.5 钢的淬火 .....                | 107       |
| 7.5.1 淬火的目的 .....             | 108       |
| 7.5.2 淬火温度的选择 .....           | 108       |

|                     |            |
|---------------------|------------|
| 7.5.3 淬火冷却介质        | 108        |
| 7.5.4 常用的淬火方法       | 109        |
| 7.5.5 钢的淬透性         | 110        |
| 7.6 钢的回火            | 112        |
| 7.7 钢的表面淬火          | 113        |
| 7.7.1 感应加热表面淬火      | 114        |
| 7.7.2 火焰加热表面淬火      | 115        |
| 7.8 钢的化学热处理         | 115        |
| 7.8.1 渗碳            | 115        |
| 7.8.2 氮化            | 118        |
| 7.9 热处理新技术新工艺       | 119        |
| 思考题                 | 121        |
| <b>第8章 工业用钢及其应用</b> | <b>122</b> |
| 8.1 概述              | 122        |
| 8.2 钢的分类和编号         | 122        |
| 8.2.1 钢的分类          | 122        |
| 8.2.2 钢的编号          | 123        |
| 8.3 钢中杂质与合金元素的作用    | 126        |
| 8.3.1 常存杂质元素对钢性能的影响 | 126        |
| 8.3.2 钢中合金元素的作用     | 127        |
| 8.4 结构钢             | 132        |
| 8.4.1 碳素结构钢         | 132        |
| 8.4.2 优质碳素结构钢       | 132        |
| 8.4.3 低合金高强度结构钢     | 135        |
| 8.4.4 渗碳钢           | 136        |
| 8.4.5 调质钢           | 137        |
| 8.4.6 弹簧钢           | 139        |
| 8.4.7 滚动轴承钢         | 142        |
| 8.4.8 耐磨钢           | 145        |
| 8.4.9 铸钢            | 145        |
| 8.5 工模具钢            | 147        |
| 8.5.1 刀具钢           | 147        |
| 8.5.2 模具钢           | 150        |
| 8.5.3 量具钢           | 154        |
| 8.6 特殊性能钢           | 157        |
| 8.6.1 不锈钢           | 157        |
| 8.6.2 耐热钢           | 160        |
| 思考题                 | 163        |



|                  |     |
|------------------|-----|
| 第 9 章 铸铁及其应用     | 164 |
| 9.1 铸铁的石墨化过程     | 164 |
| 9.1.1 铁碳合金双重相图   | 164 |
| 9.1.2 铸铁的石墨化过程   | 164 |
| 9.1.3 影响石墨化的因素   | 165 |
| 9.2 灰口铸铁的特点及分类   | 166 |
| 9.3 常用铸铁         | 168 |
| 9.3.1 灰铸铁        | 168 |
| 9.3.2 可锻铸铁       | 169 |
| 9.3.3 球墨铸铁       | 170 |
| 9.3.4 蠕墨铸铁       | 172 |
| 9.4 特殊性能铸铁       | 173 |
| 9.4.1 耐磨铸铁       | 173 |
| 9.4.2 耐热铸铁       | 174 |
| 9.4.3 耐蚀铸铁       | 174 |
| 9.5 铸铁的热处理       | 174 |
| 9.5.1 去应力退火热处理   | 174 |
| 9.5.2 石墨化退火热处理   | 175 |
| 9.5.3 改变基体组织的热处理 | 176 |
| 思考题              | 178 |
| 第 10 章 有色金属及其应用  | 179 |
| 10.1 固溶与时效强化     | 179 |
| 10.1.1 固溶处理与时效   | 179 |
| 10.1.2 时效过程      | 180 |
| 10.1.3 时效处理的影响因素 | 182 |
| 10.1.4 时效强化的应用   | 182 |
| 10.2 铝及铝合金       | 183 |
| 10.2.1 纯铝        | 183 |
| 10.2.2 铝合金       | 183 |
| 10.3 铜及铜合金       | 188 |
| 10.3.1 纯铜        | 188 |
| 10.3.2 铜合金       | 188 |
| 10.4 镁及镁合金       | 192 |
| 10.4.1 纯镁        | 192 |
| 10.4.2 镁合金       | 192 |
| 10.4.3 镁合金的热处理   | 194 |
| 10.4.4 镁合金的特点与应用 | 194 |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 10.5 钛及钛合金 .....              | 195        |
| 10.5.1 纯钛 .....               | 195        |
| 10.5.2 钛合金 .....              | 196        |
| 10.6 轴承合金 .....               | 197        |
| 思考题 .....                     | 200        |
| <b>第 11 章 非金属材料及其应用 .....</b> | <b>201</b> |
| 11.1 高分子材料 .....              | 201        |
| 11.1.1 高分子材料的定义 .....         | 201        |
| 11.1.2 高分子聚合物的组成 .....        | 201        |
| 11.1.3 高分子聚合物的合成 .....        | 202        |
| 11.1.4 高分子材料的命名及分类 .....      | 202        |
| 11.1.5 工程塑料 .....             | 204        |
| 11.1.6 合成橡胶与合成纤维 .....        | 209        |
| 11.1.7 合成胶粘剂和涂料 .....         | 211        |
| 11.2 陶瓷材料 .....               | 213        |
| 11.2.1 陶瓷材料的分类 .....          | 213        |
| 11.2.2 陶瓷的制造工艺 .....          | 214        |
| 11.2.3 陶瓷的结构 .....            | 215        |
| 11.2.4 常用工业陶瓷 .....           | 216        |
| 11.2.5 金属陶瓷 .....             | 218        |
| 11.3 复合材料 .....               | 220        |
| 11.3.1 复合材料的定义 .....          | 220        |
| 11.3.2 复合材料的分类 .....          | 221        |
| 11.3.3 复合材料的性能特点 .....        | 222        |
| 11.3.4 常用复合材料简介 .....         | 223        |
| 思考题 .....                     | 226        |
| <b>第 12 章 机械工程材料的选用 .....</b> | <b>227</b> |
| 12.1 机械零件的失效分析 .....          | 227        |
| 12.1.1 失效的形式 .....            | 227        |
| 12.1.2 失效的原因 .....            | 231        |
| 12.1.3 失效分析的方法 .....          | 231        |
| 12.2 选材的基本原则与方法 .....         | 233        |
| 12.2.1 使用性能原则 .....           | 233        |
| 12.2.2 工艺性能原则 .....           | 235        |
| 12.2.3 经济性原则 .....            | 236        |
| 12.2.4 选材的基本方法 .....          | 237        |
| 12.3 选材实例 .....               | 238        |

---

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 12.3.1 单级齿轮减速器 .....        | 238        |
| 12.3.2 汽车发动机曲柄连杆机构 .....    | 239        |
| 思考题 .....                   | 242        |
| <b>第 13 章 综合训练与实验 .....</b> | <b>243</b> |
| 13.1 综合训练 .....             | 243        |
| 13.1.1 铁碳合金综合训练 .....       | 243        |
| 13.1.2 钢的热处理综合训练 .....      | 246        |
| 13.2 实验 .....               | 249        |
| 实验 I 铁碳合金平衡组织观察 .....       | 249        |
| 实验 II 碳钢的热处理及硬度测定 .....     | 250        |
| 实验 III 钢的热处理后的显微组织观察 .....  | 255        |
| 实验 IV 铸铁及有色金属的显微组织观察 .....  | 256        |
| 实验 V 钢的热处理综合实验 .....        | 256        |
| 实验 VI 钢的热处理创新实验 .....       | 257        |
| <b>参考文献 .....</b>           | <b>258</b> |

# 第 1 章 材料的分类与钢铁生产

能源、信息和材料是现代文明的三大支柱,而材料又是一切技术发展的物质基础。材料是指人类社会能接受的,用于经济地制造有用物品的物质。

## 1.1 材料的分类

### 1.1.1 元素、物质、材料

元素周期表中按一定规律汇集了自然界所有被发现的元素,以及经过人工方法合成的元素,这些元素就是当代物质文明的基础。表中不同族的元素有较大的性能差异,由不同元素构成的物质性能也不同。如自然界存在量最多的水和石头,水由氢元素和氧元素组成;许多石头的主要成分是  $\text{SiO}_2$ ,由硅元素和氧元素组成,它们的性能完全不同。物质是元素的载体,物质的种类不计其数,但物质还不完全是材料。

我们说“材料是能为人类用于经济地制造有用物品的物质”,这就是说,物质中只有一部分是材料,材料的一大特点就是能为人类使用。另外,经济性也很重要,如天然金刚石很硬,这个性能很有用,但由于它的稀有和昂贵,一般不将其作为材料使用。由于要使用材料,人类必须熟悉了解材料。“机械工程材料”这门课程就是围绕材料的最基本问题展开,以便获得性能满足我们使用要求的材料。

### 1.1.2 材料的发展史

人类社会发展的历史阶段常常用当时主要使用的材料来划分。从古代到现在人类使用材料的历史共经历了 7 个时代,各时代的开始时间如下。

石器时代: 公元前 10000 年;

青铜器时代: 公元前 3000 年;

铁器时代: 公元前 1000 年;

水泥时代: 公元 0 年;

钢时代: 1800 年;

硅时代: 1950 年;

新材料时代: 1990 年。

综观现代各种工程用材、各种机械产品,大部分用的还是金属材料。为什么金属材料至今依然被广泛应用? 因为其性能优越,且具有更新发展的潜力。金属材料的主导地位是否仍将延续下去呢?

### 1.1.3 材料的分类

工程材料是指材料领域中与工程有关的材料,主要应用于机械制造、航空航天、化工、建

筑、矿山与交通等部门。

按其应用领域,材料可分为机械工程材料、建筑工程材料、电子工程材料、航空材料等。

按其性能特点,材料可分为结构材料和功能材料。结构材料是承受外加载荷而保持其形状和结构稳定的材料,是以强度、刚度、韧性、硬度、疲劳强度等力学性能为主,兼有一定的物理、化学性能;功能材料是指具有一种或几种特定功能的材料,用于非承载目的的材料,是具有声、光、电、磁、热等物理、化学、生物性能的材料。功能材料是能源、计算机、通信、电子、激光等现代科学的基础,在未来的社会发展中具有重大的战略意义,如储氢材料、梯度功能材料、纳米金属材料、智能金属材料等。结构材料用量极大,是当代社会的主要材料,是本书讨论的重点。功能材料目前用量虽小,但却是高新技术的关键,是知识密集、技术密集、附加值高的新材料。

工程上通常按材料的化学属性及其结合键将材料分为金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料等四大类。钢铁、陶瓷、塑料和玻璃钢分别为这4种材料的典型代表。

### 1. 金属材料

金属材料是由金属元素或以金属元素为主形成的具有金属特性的材料的统称。

#### 1) 分类

工业上把金属及其合金分成两大类。

##### (1) 黑色金属

黑色金属是指铁和以铁为基的合金(钢、铸铁和铁合金)。黑色金属应用最广,以铁为基的合金材料占整个结构材料和工具材料的90%以上,黑色金属的工程性能比较优越,价格也比较便宜。

##### (2) 有色金属

有色金属是指黑色金属以外的所有金属及其合金,常分为五大类:

- ① 轻金属( $\rho < 4.5\text{g/cm}^3$ ),如 Al、Mg、Na、Ca 等;
- ② 重金属( $\rho > 4.5\text{g/cm}^3$ ),如 Cu、Ni、Pb、Zn 等;
- ③ 贵金属,如 Au、Ag、Pt、Rh 等;
- ④ 类(半)金属,如 Si、Se、As、B 等;
- ⑤ 稀有金属,如 Ti、Li、W、Mo、Ra 等。

#### 2) 基本特性

- (1) 金属键,常规法生产的为晶体结构;
- (2) 常温下为固体,熔点较高;
- (3) 具有金属光泽;
- (4) 纯金属范性大,展性、延性大;
- (5) 强度较高;
- (6) 导热、导电性好;
- (7) 空气中易氧化。

#### 3) 用途

金属材料是用量最大、用途最广的主要工程材料,历来占据材料消费的主导地位,并预计在未来相当长的时间内还将延续下去。

金属材料的用途:机床、机械设备、交通工具、导电材料等。

## 2. 无机非金属材料

以某些元素的氧化物、碳化物、氮化物、卤素化合物、硼化物以及硅酸盐、铝酸盐、磷酸盐、硼酸盐等物质组成的材料称为无机非金属材料。

### 1) 分类

按成分、化学结构和用途,无机非金属材料分为四大类:混凝土、玻璃、硅及耐火材料、陶瓷(器)。其中陶瓷又分为传统陶瓷(由天然硅酸盐矿,如各种粘土烧制而成)和特种陶瓷(人工化合物:氧化物、氮化物、硼化物、碳化物)。

### 2) 基本特性

以陶瓷为例(其他有较大差别),其基本特性如下:

- (1) 离子键、共价键及其混合键;
- (2) 硬而脆;
- (3) 熔点高、耐高温、抗氧化;
- (4) 导热、导电性差;
- (5) 耐化学腐蚀性好;
- (6) 耐磨。

### 3) 用途

建筑卫生陶瓷,如瓷砖、浴缸等;工程结构陶瓷,如反应釜(耐酸、耐腐蚀)、绝缘瓷瓶等;功能陶瓷,如磁性陶瓷、导电陶瓷等。

## 3. 高分子材料

高分子材料又称聚合物材料,主要指以高分子化合物为基础制得的材料,由许多相对分子质量特别大的大分子所组成,而每个大分子由大量结构相同的单元(链节)相互连接而成。

### 1) 分类

按主链结构,高分子材料分为碳链( $\text{—C—C—C—}$ )、杂链( $\text{—C—N—C=O—}$ 、 $\text{—C—O—C—}$ )等;按使用性质,高分子材料分为塑料、橡胶、合成纤维、粘合剂、涂料等。

### 2) 基本特性

- (1) 共价键、部分范氏键;
- (2) 相对分子质量大,无明显熔点,有玻璃化转变温度  $T_g$  和粘流温度  $T_f$ ;
- (3) 力学状态有 3 态,即玻璃态、高弹态、粘流态;
- (4) 比重小;
- (5) 绝缘性好;
- (6) 优越的化学稳定性。

### 3) 用途

结构材料,如电视机壳体、冰箱壳体、轴承、机械零件等;绝缘材料,如漆包线、电缆、绝缘板、电器零件等;建筑材料,如贴面板、地贴等;包装材料,如塑料袋、薄膜、泡沫塑料等;涂装饰材料,如涂料、粘合剂等;日用材料,如织物(衣服)、胶鞋等;运输材料,如轮胎、传送带等。

## 4. 复合材料

金属、无机非金属材料、高分子材料各有优缺点,若将以上两种或两种以上的材料微观地组合在一起,形成具有与其组成不同的新的性能的材料便是复合材料。复合材料发挥了

其组成材料各自的长处,又在一定程度上克服了各自的弱点,因而是一种优异的新型材料。

### 1) 分类

按性能分为结构复合材料、功能复合材料;按增强剂形状及增强机理分为粒子增强复合材料、纤维增强复合材料;按基体材料分为树脂基复合材料、金属基复合材料和陶瓷基复合材料。

### 2) 基本特性

- (1) 抗疲劳性能良好;
- (2) 结构件减震性好;
- (3) 比强度高和比模量高;
- (4) 耐烧性能和耐高温性能好;
- (5) 具有良好的减磨、耐磨和润滑性能。

### 3) 用途

无机-高分子玻璃纤维增强塑料(玻璃钢),可用于汽车、游艇等;碳纤维增强塑料,可用于飞机机翼、高尔夫球棍、撑杆跳杆等;金属-陶瓷复合材料,可用于飞机螺旋桨叶片等;高分子-高分子复合材料,如橡胶增韧塑料,可用于抗冲 ABS 树脂等减震材料;硼连续纤维增强的铝基复合材料,可制成管材作为航天飞机结构桁架等。

## 1.2 钢铁材料生产简介

钢铁材料是应用最广泛的金属材料,是现代工业特别是机械制造业的支柱。钢铁材料通常是通过冶炼和轧制获得的。要研究钢铁材料的组织性能,就要从钢铁材料的来源说起。

### 1.2.1 炼铁

铁是钢铁材料的基本组成元素。自然界的铁以各种氧化物的形式存在,并且同其他元素的化合物混在一起。炼铁的基本任务:一是实现金属氧化物的金属元素(主要是铁元素)和氧元素的分离,即还原过程;二是实现矿石中被还原的金属与脉石的有效分离,即熔化和造渣过程。

#### 1. 炼铁的基本过程

炼铁分为高炉炼铁和非高炉炼铁两大类,其中高炉炼铁技术成熟,生产产量占到生铁产量的 90% 以上,所以本书仅介绍高炉炼铁。高炉结构如图 1-1 所示。

高炉炼铁的原料主要有铁矿石、燃料和熔剂,各种原料应配成一定比例,才能使炼铁可行且经济。炉料不断从进料口加入炉内,空气经热风炉预热后从进风口吹入炉中。在冶炼过程中,炉料充满

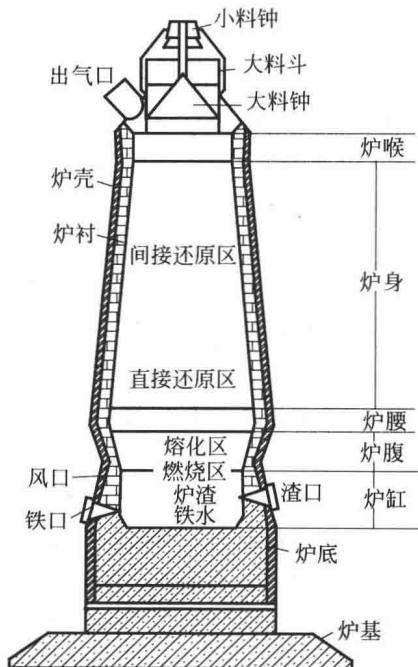


图 1-1 高炉结构示意图

高炉,并不断下降;吹入炉中的空气与化学反应生成的气体组成炉气并沿着炉料的缝隙上升。冶炼一定时间后,先打开出渣口排渣,再打开出铁口出铁。从炉顶排出的废气(高炉煤气)经煤气出口回收。炼铁的基本过程包括燃料的燃烧、铁的还原和增碳、杂质的混入、选渣等。

炼铁采用的燃料主要是焦炭,焦炭燃烧产生的热量为冶炼提供了高温条件,高温焦炭及其燃烧生成的 CO 气体还起到了还原剂的作用。炼铁时,焦炭和 CO 不断把铁从铁矿石中还原出来,同时碳也溶入铁。最终炼成的铁中碳的质量分数达 4%左右。另外,炉料中的硅、锰、硫、磷等杂质也会溶入铁中。

炼铁时,焦炭燃烧形成的灰粉及矿石中的废石与铁混在一起。通常,加入石灰石与灰粉、废石等构成造渣反应,使之成为熔点较低、密度较小的熔渣,浮在铁液上面。只要使出渣口稍高于出铁口,就能使铁与渣分离。

## 2. 高炉产品

### 1) 生铁

高炉冶炼的铁不是纯铁,而是含有碳、硅、锰、硫、磷等元素的合金,称为生铁。生铁是高炉的主要产品。按含硅量不同,生铁分为炼钢生铁和铸造生铁。炼钢生铁的含硅量较低, $w(\text{Si}) < 1.25\%$ ,主要用于炼钢;铸造生铁的含硅量较高, $w(\text{Si}) = 1.25\% \sim 3.2\%$ ,主要用于铸造。

### 2) 炉渣

炉渣是制造水泥的原料。

### 3) 高炉煤气

高炉煤气经净化可作为气体燃料使用,如加热热风炉及作为民用管道煤气等。

## 1.2.2 炼钢

生铁中含有较多的杂质,使得生铁的性能常常不能满足加工和使用的要求。炼钢的本质,是利用氧化的办法清除生铁中的硅、锰、硫、磷等杂质和过量的碳,使其化学成分达到标准规定的要求,从而改善其性能。钢中碳及各种杂质的含量比生铁要低得多。表 1-1 列出了炼钢生铁与低碳钢的主要成分。

表 1-1 炼钢生铁与低碳钢的主要成分

%

| 材 料  | C         | Si                | Mn       | P                | S                 |
|------|-----------|-------------------|----------|------------------|-------------------|
| 炼钢生铁 | 4~4.4     | $>0.85 \sim 1.25$ | $>0.50$  | $>0.25 \sim 0.4$ | $>0.05 \sim 0.07$ |
| 低碳钢  | 0.14~0.22 | 0.12~0.3          | 0.4~0.65 | 0.05             | 0.055             |

## 1. 炼钢的基本过程

### 1) 氧化过程

生铁中的碳、硅、锰、磷等在高温条件下与氧的亲合力比铁强。炼钢时加入的氧化剂(氧气、铁矿石等)将优先与这些杂质产生化学反应,生成各种氧化物。生成的 CO 气体容易逸出,并且对钢液有搅拌作用,促使冶炼过程顺利进行;生成的硅、锰、磷等的氧化物及混入铁中的硫,将与熔剂 CaO 等构成一系列造渣反应生成炉渣。



## 2) 脱氧过程

在氧化过程中大量的铁被氧化成  $\text{FeO}$ 。钢中存在  $\text{FeO}$  将使其力学性能下降, 高温时更容易脆断。因此, 在冶炼后期必须往钢液中加入脱氧剂(硅铁、锰铁、金属铝等)。脱氧剂与  $\text{FeO}$  发生反应, 使其转化为不溶于液态金属的氧化物, 并析出转入熔渣。

## 2. 炼钢方法

### 1) 转炉炼钢法

常见的氧气顶吹转炉炼钢法如图 1-2(a) 所示。炉体可以绕转轴转动。每炼完一炉钢都要把炉体倾斜, 倒出钢液。冶炼时以纯氧作为氧化剂, 直接利用吹氧管从炉顶向炉中吹入氧气, 依靠化学反应产生的热量就可冶炼, 不需要外加热源。

转炉炼钢法生产率高, 几十分钟就能炼一炉钢, 但必须以液态炼钢生铁为主要原料。杂质被氧化产生的热量不仅使生铁液温度提高到钢的熔点, 还能使加入的废钢熔化, 重新冶炼成好钢。废钢的加入量甚至可以达到每炉钢的 35%。氧气顶吹转炉法通常用于冶炼各种碳钢。

### 2) 电弧炉炼钢法

常见电弧炉炼钢法如图 1-2(b) 所示。冶炼时以铁矿石或纯氧为氧化剂, 以转炉钢或(和)废钢为原料, 以电弧为热源。电炉炼钢法的冶炼温度高, 炉料比较纯, 能够冶炼高级优质钢和含有高熔点金属元素(如钨、钼、钛等)的合金钢及特种钢。

## 3. 镇静钢和沸腾钢

炼好的钢常经过模铸浇注成钢锭或连铸成钢坯。图 1-3(a) 所示是使用钢锭铸型浇注钢锭, 后续需要开坯轧制。图 1-3(b) 所示是使用连铸机浇注钢坯, 浇注时, 钢液在一个用水冷却的铸型中凝固, 再用夹辊夹持移动, 并按要求的长度切断。连铸工艺由于成材率高、能耗低及铸坯质量好的优点, 已经逐步取代模铸钢锭。

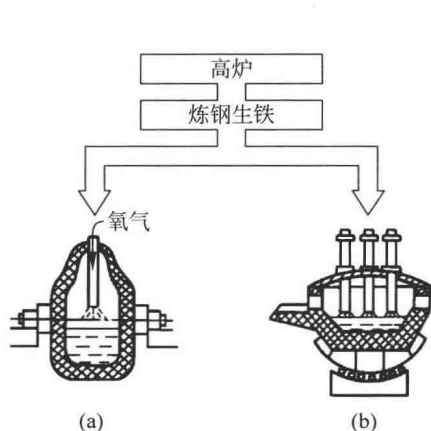


图 1-2 常用炼钢方法

(a) 氧气顶吹转炉; (b) 电弧炉

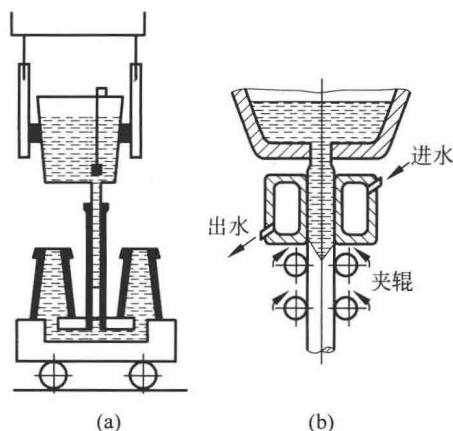


图 1-3 钢的浇注

(a) 型铸; (b) 连铸

在炼钢脱氧过程中, 通过控制脱氧剂的种类和加入量可以控制钢的脱氧程度。通常按脱氧是否完全把钢分为镇静钢与沸腾钢。

### 1) 镇静钢

镇静钢是脱氧(脱氧剂主要用硅铁或铝)完全的钢。浇注时不发生碳氧反应, 钢液在型