

“十二五”普通高等教育规划教材

# 工程训练教程

赵忠魁 张元彬 崔明铎 等编



化学工业出版社

“十二五”普通高等教育规划教材

# 工程训练教程

赵忠魁 张元彬 崔明铎 等 编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是工科专业本科工程训练（金工实习）教学用书，主要包括工程材料与热处理、铸造、锻压、焊接、管工、钳工、车削、铣削、刨削、磨削、数控加工、现代制造技术、塑料成形和陶瓷成形。

本书可供机械类、近机类专业本科教学使用，可根据本专业工程训练教学要求选用其中内容。与本书配套使用的《工程训练指导书》和《工程训练报告》同时出版，可供相关院校选用。

#### 图书在版编目（CIP）数据

工程训练教程/赵忠魁，张元彬，崔明铎等编. —北京：化学工业出版社，2014.1

“十二五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-122-19070-3

I. ①工… II. ①赵…②张…③崔… III. ①机械制造工艺-高等学校-教材 IV. ①TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 278306 号

---

责任编辑：杨 菁 李玉晖

文字编辑：林 丹

责任校对：徐贞珍

装帧设计：张 辉

---

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 17¼ 字数 445 千字 2014 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

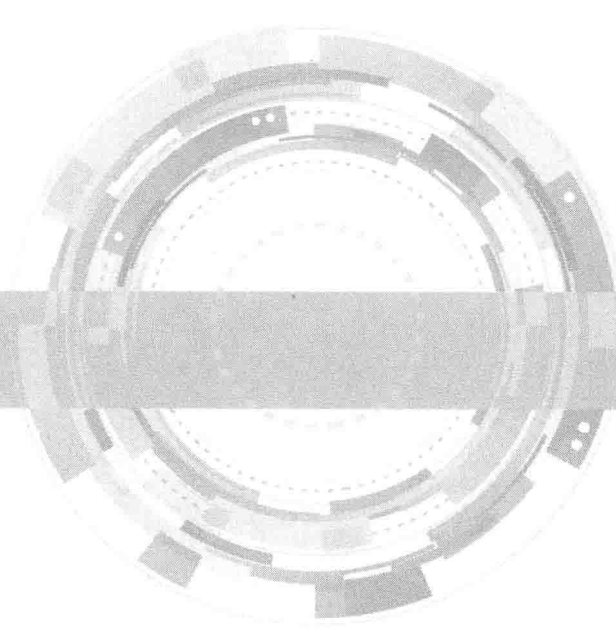
网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

---

定 价：38.00 元

版权所有 违者必究



# 前言

本书是根据教育部制定并实施的“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的精神,以及教育部、财政部关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见(即质量工程),结合金工系列课程改革与实践教学基地建设,以扩大工程训练教学内容为目的而组织编写的。本教材具有如下特点。

1. 针对多数院校现有的教学条件,考虑继续发展的需要,针对机类、近机类工科各专业,以传统机械制造方法为主,增加了管工、数控加工、快速成形技术、其他工程材料成形工艺等多种先进技术,充分体现工程训练教学内容的系统性。

2. 教材编写中强调“贴近实际、体现应用”,坚持科学性、系统性、先进性、实用性和可操作性,增加了相关技术领域最新进展的介绍。既注重学生获取知识、分析问题与解决工程技术实际问题能力的培养,又力求体现对学生工程素质和创新思维能力的培养,通过工程实训强化学生从事工程实践和创新的能力。

3. 注重学生科技创新思维和意识的引导。教材引进了许多结合社会和个人生活实际的科技新案例,希望以此激发学生的学习兴趣,培养学生的创新能力,处处体现“以学生为本”的教学思想。

4. 本书坚持叙述简练、深入浅出、直观形象、图文并茂、通俗易懂的特点,不使篇幅过大。

5. 全书名词术语和计量单位采用最新国家标准及其他有关标准。

6. 《工程训练报告》和《工程训练指导书》同时出版,配套使用。

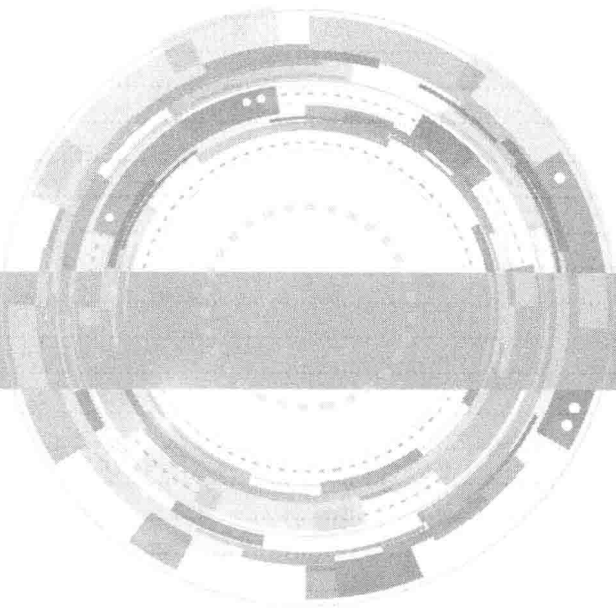
本书由赵忠魁、张元彬、崔明铎承担主要编写工作。许斌教授对书稿进行了认真审阅并提出许多宝贵的意见。

参加本书编写的还有:于宽、景财年、林晓娟、任国成、刘燕、崔浩新、米丰敏等。

本书在编写中参考了国内外相关研究领域的研究成果(见参考文献)和教材,并征求了相关人士的意见,在此谨向本书所引用参考文献的原作者表示敬意和感谢。

由于笔者理论水平及实践教学经验所限,本书难免有缺点或欠妥之处,敬希读者和各校教师同仁提出批评建议,共同做好这门课程教材建设工作。

编者  
2014 年 1 月



# 目录

|                       |    |
|-----------------------|----|
| <b>第 1 章 金属材料及热处理</b> | 1  |
| 教学基本要求                | 1  |
| 安全技术                  | 1  |
| 1.1 金属材料的性能           | 2  |
| 1.2 铁碳合金相图            | 4  |
| 1.3 金属热处理基本概念         | 7  |
| 1.4 常用金属材料            | 13 |
| 1.5 钢铁材料的现场鉴别         | 17 |
| 1.6 非金属材料             | 20 |
| 1.7 金属材料的选用           | 22 |
| 思考题                   | 23 |
| <b>第 2 章 铸造</b>       | 24 |
| 教学基本要求                | 24 |
| 安全技术                  | 24 |
| 2.1 概述                | 25 |
| 2.2 造型材料和模样           | 25 |
| 2.3 手工造型和制芯           | 28 |
| 2.4 机器造型和制芯           | 31 |
| 2.5 合金的熔炼             | 33 |
| 2.6 铸件清理和常见缺陷分析       | 36 |
| 2.7 特种铸造方法            | 39 |
| 思考题                   | 45 |
| <b>第 3 章 锻压</b>       | 46 |
| 教学基本要求                | 46 |
| 安全技术                  | 46 |
| 3.1 概述                | 47 |
| 3.2 金属的加热和锻件的冷却       | 49 |
| 3.3 自由锻               | 51 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 3.4 模锻 .....            | 54  |
| 3.5 冲压 .....            | 57  |
| 3.6 压力加工新工艺简介 .....     | 60  |
| 思考题 .....               | 64  |
| <b>第4章 焊接</b> .....     | 65  |
| 教学基本要求 .....            | 65  |
| 安全技术 .....              | 65  |
| 4.1 概述 .....            | 65  |
| 4.2 焊条电弧焊 .....         | 66  |
| 4.3 其他焊接方法 .....        | 73  |
| 思考题 .....               | 79  |
| <b>第5章 管工</b> .....     | 80  |
| 教学基本要求 .....            | 80  |
| 安全技术 .....              | 80  |
| 5.1 概述 .....            | 80  |
| 5.2 管工基本知识 .....        | 81  |
| 5.3 管工操作 .....          | 87  |
| 思考题 .....               | 98  |
| <b>第6章 切削基础知识</b> ..... | 99  |
| 教学基本要求 .....            | 99  |
| 6.1 切削的概念 .....         | 99  |
| 6.2 零件的技术要求 .....       | 101 |
| 6.3 常用量具 .....          | 104 |
| 思考题 .....               | 108 |
| <b>第7章 钳工</b> .....     | 109 |
| 教学基本要求 .....            | 109 |
| 安全技术 .....              | 109 |
| 7.1 概述 .....            | 110 |
| 7.2 划线 .....            | 111 |
| 7.3 锯削 .....            | 116 |
| 7.4 锉削 .....            | 118 |
| 7.5 孔与螺纹加工 .....        | 121 |
| 7.6 刮削 .....            | 129 |
| 7.7 装配 .....            | 130 |
| 7.8 典型钳工件示例 .....       | 133 |
| 思考题 .....               | 134 |
| <b>第8章 车削</b> .....     | 135 |
| 教学基本要求 .....            | 135 |
| 安全技术 .....              | 135 |
| 8.1 概述 .....            | 136 |
| 8.2 普通车床 .....          | 136 |
| 8.3 车刀 .....            | 140 |
| 8.4 工件的安装及所用附件 .....    | 145 |
| 8.5 基本车削工作 .....        | 148 |
| 8.6 典型零件车削工艺示例 .....    | 157 |
| 思考题 .....               | 160 |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| <b>第 9 章 铣削</b>      | 161 |
| 教学基本要求               | 161 |
| 安全技术                 | 161 |
| 9.1 概述               | 161 |
| 9.2 铣床及其附件           | 162 |
| 9.3 铣刀和工件安装          | 165 |
| 9.4 铣削工艺             | 166 |
| 9.5 齿面加工             | 173 |
| 思考题                  | 176 |
| <b>第 10 章 刨削</b>     | 177 |
| 教学基本要求               | 177 |
| 安全技术                 | 177 |
| 10.1 概述              | 177 |
| 10.2 刨床              | 178 |
| 10.3 刨刀              | 180 |
| 10.4 刨削工艺            | 182 |
| 10.5 拉削简介            | 184 |
| 思考题                  | 186 |
| <b>第 11 章 磨削</b>     | 187 |
| 教学基本要求               | 187 |
| 安全技术                 | 187 |
| 11.1 概述              | 187 |
| 11.2 磨床              | 188 |
| 11.3 砂轮              | 190 |
| 11.4 磨削工艺            | 193 |
| 11.5 精整与光整加工         | 198 |
| 11.6 先进磨削方法简介        | 200 |
| 思考题                  | 201 |
| <b>第 12 章 数控加工</b>   | 202 |
| 教学基本要求               | 202 |
| 安全技术                 | 202 |
| 12.1 概述              | 202 |
| 12.2 数控程序结构和指令       | 204 |
| 12.3 数控加工技术          | 208 |
| 思考题                  | 215 |
| <b>第 13 章 现代制造技术</b> | 217 |
| 教学基本要求               | 217 |
| 安全技术                 | 217 |
| 13.1 现代制造技术的产生与特点    | 218 |
| 13.2 快速成形技术          | 218 |
| 13.3 电火花加工           | 226 |
| 13.4 电解加工            | 228 |
| 13.5 超声波加工           | 230 |
| 13.6 激光加工            | 231 |
| 13.7 电子束和离子束加工       | 233 |
| 13.8 电铸加工            | 234 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 13.9 先进制造技术简介 .....        | 235 |
| 思考题 .....                  | 236 |
| <b>第 14 章 塑料成型基础</b> ..... | 237 |
| 教学基本要求 .....               | 237 |
| 安全技术 .....                 | 237 |
| 14.1 概述 .....              | 237 |
| 14.2 塑料的一次成型 .....         | 238 |
| 14.3 塑料的二次成型 .....         | 242 |
| 14.4 塑料的二次加工 .....         | 243 |
| 思考题 .....                  | 245 |
| <b>第 15 章 陶瓷成形</b> .....   | 247 |
| 教学基本要求 .....               | 247 |
| 安全技术 .....                 | 247 |
| 15.1 概述 .....              | 248 |
| 15.2 粉体的制备技术 .....         | 249 |
| 15.3 陶艺工具与材料 .....         | 250 |
| 15.4 陶瓷成形工艺 .....          | 251 |
| 15.5 陶瓷装饰技法 .....          | 259 |
| 15.6 烧制 .....              | 261 |
| 思考题 .....                  | 264 |
| <b>主要参考文献</b> .....        | 265 |



# 第1章 金属材料及热处理

## 教学基本要求

1. 掌握常用工程材料中的金属与非金属材料的种类、牌号、性能及主要用途、硬度检测。
2. 了解热处理车间常用加热炉（箱式电阻炉、盐浴炉、井式电阻炉）的大致结构及温度控制方式与应用场合。
3. 熟悉整体热处理工艺方法（退火、正火、淬火、回火及渗碳）的基本操作及其应用，了解热处理的新技术、新工艺。
4. 了解热处理件的质量检验及主要缺陷的预防方法。
5. 会应用火花鉴别法、色标鉴别法、断口宏观鉴别法和音色鉴别法等区分常见金属材料。

## 安全技术

1. 进入训练场地要听从指导教师安排，安全着装，认真听讲，仔细观摩，严禁嬉戏打闹，保持场地干净整洁。
2. 学生必须在掌握相关设备和工具的正确使用方法后，才能进行操作。未经许可或指导教师不在场的情况下，不准开动机器设备。
3. 热处理完成后，将工件迅速取出加热炉，置放于老师指定位置，注意防止烫伤。清理零件上多余的氧化皮时，必须佩戴护目镜，防止碎片溅入眼内，同时应尽量使用工具去除，减少用手直接接触，防止手被划伤。
4. 训练结束先后关闭机器设备及电源，然后收拾好工具等物品并将场地清扫干净。

工程材料选用得是否合适，对机器设备的可靠性和使用寿命有直接影响，与机器设备的制造工艺、成本和生产效率也直接相关。凡工程技术人员在进行机器设备的设计、制造、使

用或维修时，都必须了解材料的性能、牌号及其用途，才能正确地选用材料。

### 1.1 金属材料的性能

金属材料的性能包括使用性能和工艺性能。使用性能反映材料在使用过程中所表现出来的特性，如物理性能、化学性能、力学性能等。通常情况下，以材料的力学性能作为主要依据来选用金属材料。

金属的力学性能是指金属在力的作用下所显示的与弹性和非弹性反应相关或涉及应力-应变关系的性能。金属力学性能所用的指标和依据称为金属的力学性能判据。主要力学性能有强度、塑性、硬度、韧性等。

#### 1.1.1 强度

GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》规定了金属材料的强度和塑性的拉伸试验方法、测定方法与要求。

试验过程为：准备试样（图 1-1），在拉伸试验机上加加载，试样在载荷作用下发生弹性变形、塑性变形直至最后断裂。在拉伸中，试验机自动记录每一瞬间的载荷和伸长量之间的关系，并绘出拉伸曲线图（纵坐标为载荷，横坐标为伸长量）或应力-应变曲线图（图 1-2）。由计算机控制的具有数据采集系统的试验机可直接获得强度和塑性的试验数据。

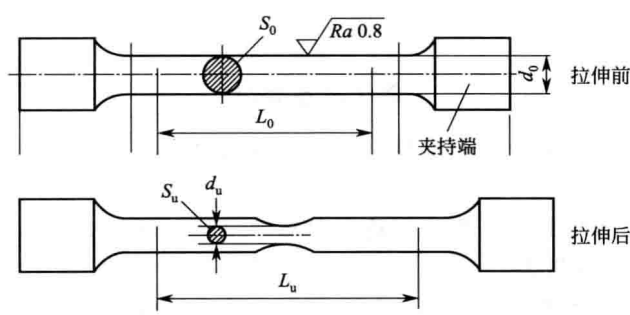


图 1-1 拉伸试样图

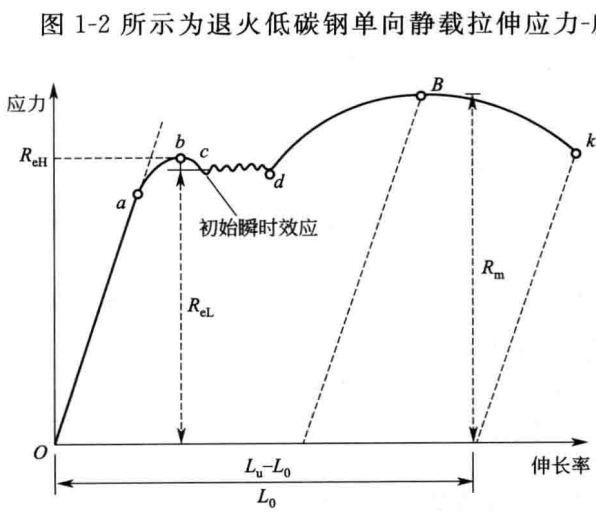


图 1-2 退火低碳钢拉伸曲线图

图 1-2 所示为退火低碳钢单向静载拉伸应力-应变曲线。其中  $abcd$  段为屈服变形阶段， $dB$  为均匀塑性变形阶段， $B$  为试样屈服后所能承受的最大应力 ( $R_m$ ) 点， $B_k$  是颈缩阶段。曲线图可直接反映出材料的强度与塑性的性能高低。

强度是材料抵抗塑性变形和破坏的能力。按外力的作用方式不同，可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度和剪切强度等。当承受拉力时，强度特性指标主要是屈服强度和抗拉强度。

##### 1.1.1.1 屈服强度

屈服强度是指当金属材料呈现屈服现象时，在试验期间达到塑性变形发生而力不增加的应力点。应区分上屈服强度和下屈服强度。测定上屈服强度用的

力是试验时在拉伸曲线图上读取的曲线首次下降前的最大力。测定下屈服强度用的力是试样

屈服时，不计初始瞬时效应时的最小力（见图 1-2）。

上屈服强度和下屈服强度都是用载荷（力）除以试样原始横截面积（ $S_0$ ）得到的应力值表示，其符号分别为  $R_{eH}$ （MPa）和  $R_{eL}$ （MPa）（见图 1-2）。

有些金属材料的拉伸曲线上没有明显的屈服现象，如高碳钢和脆性材料等，可采用规定非比例延伸强度  $R_p$ ，如按规定非比例延伸率为 0.2% 时对应的应力值作为规定非比例延伸强度，用符号  $R_{p0.2}$ （MPa）表示。

### 1.1.1.2 抗拉强度

抗拉强度是指试样被拉断前的最大承载能力（ $F_m$ ）除以试样原始横截面积（ $S_0$ ）得到的应力值，用符号  $R_m$ （MPa）表示（见图 1-2）。

屈服强度、抗拉强度是在选定金属材料及机械零件强度设计时重要依据。

### 1.1.2 塑性

材料在外力作用下，产生塑性变形而不断裂的性能称为塑性。塑性大小常用断后伸长率（ $A$ ）和断面收缩率（ $Z$ ）表示：

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\%$$

式中  $L_u$ ——试样拉断后的标距长度（图 1-1），mm；

$S_u$ ——试样拉断后的最小横截面积，mm<sup>2</sup>。

$A$  和  $Z$  的值愈大，材料的塑性愈好。应当说明的是：仅当试样的标距长度、横截面的形状和面积均相同时，或当选取的比例试样的比例系数  $k$  相同时，断后伸长率的数值才具有可比性。

金属材料应具有一定的塑性才能顺利地承受各种变形加工，并且有一定塑性的金属零件，可以提高零件使用的可靠性，不致出现突然断裂。

目前，还有许多金属材料的力学性能名词符号是沿用旧标准 GB/T 228—1987 标注的，为方便使用，表 1-1 列出了关于金属材料强度与塑性的新、旧标准名词和符号对照表。

表 1-1 金属材料强度与塑性的新、旧标准名词和符号对照表

| 新标准(GB/T 228—2002) |                        | 旧标准(GB/T 228—1987) |                                  |
|--------------------|------------------------|--------------------|----------------------------------|
| 性能名称               | 符号                     | 性能名称               | 符号                               |
| 断面收缩率              | $Z$                    | 断面收缩率              | $\psi$                           |
| 断后伸长率              | $A$<br>$A_{11.3}$      | 断后伸长率              | $\delta_5$<br>$\delta_{10}$      |
| 屈服强度               | —                      | 屈服强度               | $\sigma_s$                       |
| 上屈服强度              | $R_{eH}$               | 上屈服强度              | $\sigma_{sU}$                    |
| 下屈服强度              | $R_{eL}$               | 下屈服强度              | $\sigma_{sL}$                    |
| 规定非比例延伸强度          | $R_p$<br>例如 $R_{p0.2}$ | 规定非比例延伸强度          | $\sigma_p$<br>例如 $\sigma_{p0.2}$ |
| 抗拉强度               | $R_m$                  | 抗拉强度               | $\sigma_b$                       |

### 1.1.3 硬度

硬度是指材料抵抗局部变形，特别是塑性变形、压痕或划痕的能力。硬度是衡量金属软硬程度的性能指标，常用的硬度判据有布氏硬度和洛氏硬度两种。布氏硬度用符号 HBW 表示，洛氏硬度常用符号 HRA、HRB 和 HRC 等表示，其中 HBW 值和 HRC 值在生产中常用来表示材料（或零部件）的硬度。硬度值的大小是在硬度计上通过硬度试验法测得的。

布氏硬度适用于测量较软的金属或未经淬火的钢件，其值有效范围小于 650HBW；

HRC 适用于测定经热处理淬硬的钢件，有效范围在 20~70HRC。表示方法为数字在前，硬度符号在后，如 160~180HBW（规定差值 $\leq 30$ ），46~50HRC（规定差值 $\leq 5$ ）。数字越大，材料硬度越高。

#### 1.1.4 韧性

韧性是指金属在断裂前吸收变形能量和断裂能量的能力。金属韧性的判据常用冲击吸收能量（ $k$ ）表示，它是通过冲击试验确定的。其值越大，材料韧性越好。

实践证明，材料的多次重复冲击抗力取决于材料强度与韧性的综合力学性能，冲击能量高时，主要取决于材料的韧性；冲击能量低时，主要取决于强度。

#### 1.1.5 疲劳

材料在循环应力或应变作用下，在一处或几处产生局部永久性累积损伤，经一定循环次数后产生裂纹或突然发生完全断裂的过程，称为疲劳。金属疲劳的判据是疲劳强度。在工程上，疲劳强度是指在一定的应力循环次数（一般规定：钢铁材料的应力循环次数取  $10^7$ ，有色金属取  $10^8$ ）下不发生断裂的最大应力。光滑试样对称弯曲疲劳强度用符号  $\sigma_{-1}$  表示。由于疲劳断裂前无明显的塑性变形，断裂是突然发生的，危险性很大。

影响金属疲劳强度的因素很多，如零件外形、受力状态、表面质量和周围介质等。合理设计零件结构、避免应力集中、降低表面粗糙度值以及进行表面强化等，可以提高工件的疲劳强度。

### 1.2 铁碳合金相图

铁碳合金相图是人类经过长期生产实践并进行大量科学实验后总结出来的，是表示平衡状态下，不同成分的铁碳合金在不同温度时具有的状态或组织的图形，是研究钢和生铁的基础，它对于了解钢铁材料的性能、加工、应用等具有重要的指导意义。铁和碳可以形成一系列化合物，考虑到工业上的使用价值，目前应用的铁碳合金相图是 Fe-Fe<sub>3</sub>C 部分（ $w_C < 6.69\%$ ）。如图 1-3 所示为简化的 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图。

#### 1.2.1 铁碳合金的基本组织

##### 1.2.1.1 铁素体（F）

铁素体是  $\alpha$ -铁中溶入一种或多种溶质元素构成的固溶体。其性能与纯铁相似，即强度、硬度低，塑性、韧性好。正常侵蚀后在显微镜下呈白亮色，在钢中的形态多为不规则的多边形块，在接近共析成分的钢中，往往呈网状或断续网状。

##### 1.2.1.2 奥氏体（A）

奥氏体是  $\gamma$ -铁中溶入碳和（或）其他元素构成的固溶体。其强度和硬度比铁素体高，塑性、韧性也好。因此，钢材多数加热到奥氏体状态进行锻造。高温显微镜下（727℃以上）才能观察到奥氏体组织。其晶粒呈多边形，且晶界较铁素体平直。

##### 1.2.1.3 渗碳体（Fe<sub>3</sub>C）

渗碳体是晶体结构属于正交系，化学式为 Fe<sub>3</sub>C 的金属化合物，是钢和铸铁中常见的固相。其硬度高，塑性、韧性差，脆性大。渗碳体在钢和铸铁中可呈片状、球状和网状分布，主要起强化作用，它的形态、大小、数量和分布对钢和铸铁的性能有很大影响。

##### 1.2.1.4 珠光体（P）

珠光体是铁素体薄层（片）与碳化物（包括渗碳体）薄层（片）交替重叠组成的共析组织。其性能介于铁素体和渗碳体之间，强度较高，硬度适中，有一定的塑性。

### 1.2.1.5 莱氏体 (Ld)

莱氏体是铸铁或高碳高合金钢中由奥氏体（或其转变的产物）与碳化物（包括渗碳体）组成的共晶组织。莱氏体冷却到 727℃ 以下时，其中的奥氏体又转变成珠光体，莱氏体成为珠光体和渗碳体的复合物，称为“低温（变态）莱氏体”（Ld'）。其力学性能与渗碳体相近。组织特征为：白亮的渗碳体为基体，上面分布着许多粒状、条状或不规则形状的黑色珠光体。

### 1.2.2 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图的图形分析

图 1-3 中的纵坐标表示温度，横坐标表示碳（或渗碳体）的质量分数。横坐标的左端表示 100% 的铁；右端  $w_C = 6.69\%$ （或 100% 的 Fe<sub>3</sub>C）。横坐标上的任一点均代表一种成分的铁碳合金。

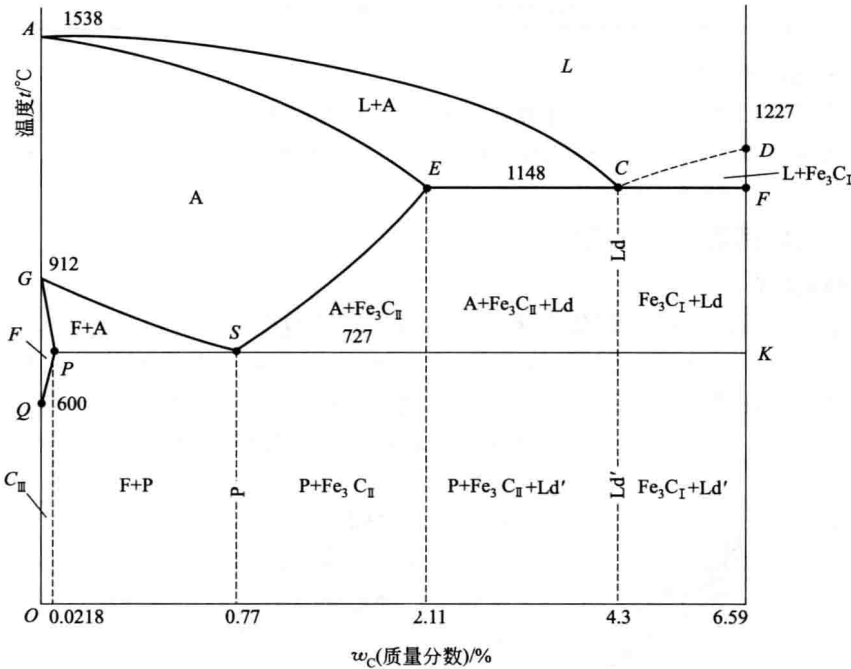


图 1-3 简化的 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图

#### 1.2.2.1 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中的特性点

Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中特性点的温度、成分及含义见表 1-2。

表 1-2 简化的 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图特性点

| 特性点 | 温度 $t / ^\circ\text{C}$ | $w_C / \%$ | 含 义                           | 特性点 | 温度 $t / ^\circ\text{C}$ | $w_C / \%$ | 含 义                               |
|-----|-------------------------|------------|-------------------------------|-----|-------------------------|------------|-----------------------------------|
| A   | 1538                    | 0          | 纯铁的熔点                         | G   | 912                     | 0          | 纯铁的同素异构转变点                        |
| C   | 1148                    | 4.3        | 共晶点                           | P   | 727                     | 0.0218     | 碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的最大溶解度     |
| D   | 1227                    | 6.69       | 渗碳体的熔点                        | S   | 727                     | 0.77       | 共析点                               |
| E   | 1148                    | 2.11       | 碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 中的最大溶解度 | Q   | 600                     | 0.0057     | 600℃ 时碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的溶解度 |

#### 1.2.2.2 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中的特性线

Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中的特性线是不同成分合金具有相同物理意义的相变点连接线，其名称及含义见表 1-3。

表 1-3 简化的 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图特性线

| 特性线     | 名 称                   | 含 义                                                                               |
|---------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| ACD 线   | 液相线                   | 在此线以上各成分的铁碳合金均处于液相,当缓冷至此线时开始结晶                                                    |
| AECF 线  | 固相线                   | 任一成分的铁碳合金缓冷至此线时全部结晶为固相;加热到此温度线时,固相开始熔化                                            |
| ECF 水平线 | 共晶线                   | $w_C > 2.11\%$ 的铁碳合金缓冷至此线时,均发生共晶转变,生成莱氏体                                          |
| PSK 水平线 | 共析线(A <sub>1</sub> 线) | $w_C > 0.0218\%$ 的铁碳合金,缓冷至此线时,均发生共析转变,生成珠光体                                       |
| GS 线    | A <sub>3</sub> 线      | $w_C < 0.77\%$ 的铁碳合金,缓冷时,将从奥氏体中析出铁素体的开始线;缓慢加热时,铁素体转变为奥氏体的终了线                      |
| ES 线    | A <sub>cm</sub> 线     | 碳在奥氏体中的溶解度曲线。 $w_C > 0.77\%$ 的铁碳合金,由高温缓冷时,从奥氏体中析出二次渗碳体的开始温度线;缓慢加热时,二次渗碳体溶入奥氏体的终了线 |

### 1. 2. 2. 3 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中的相区

简化的 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中有四个单相区,即在液相线以上的液相区、位于 AESGA 范围的奥氏体区,以及 GPQ 铁素体区和 DFK 渗碳体线。在单相区之间为过渡的二相区,如相组成 L+A、L+Fe<sub>3</sub>C<sub>I</sub> 和 A+F 等。

## 1. 2. 3 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相态图的应用

### 1. 2. 3. 1 材料选择

在设计零件时可根据铁碳相图选择材料。如若需要塑性、韧性高的材料,如建筑结构、各种容器和型材等,应选择低碳钢 ( $w_C$  为  $0.10\% \sim 0.25\%$ ); 若需要塑性、韧性和强度都相对较高的材料,如各种机器零件应选择中碳钢 ( $w_C$  为  $0.30\% \sim 0.55\%$ ) 等。白口生铁性能是硬而脆,具有很好的耐磨能力,可制造拉丝模等工件。

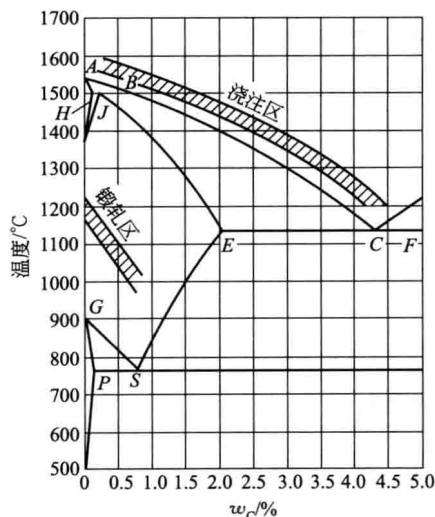


图 1-4 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图与铸锻工艺关系

免钢材氧化严重;终锻温度不能过低,以免钢材塑性变差产生裂纹。可根据图 1-4 选择合适的塑性变形温度。

### 1. 2. 3. 4 焊接工艺

在焊接工艺方面,根据相图可以了解各种铁碳合金的焊接性,焊接性主要与  $w_C$  有关,

### 1. 2. 3. 2 铸造工艺

根据合金在铸造时对流动性要求,可通过铁碳合金相图,确定钢铁合适的浇铸温度,一般在液相线以上  $50 \sim 100^\circ\text{C}$ 。共晶成分的铸铁,无凝固温度区间,且液相线温度最低,流动性好,分散缩孔少,铸造性能良好,在生产中广泛应用。

在铸钢生产中常选用碳质量分数不高的中、低碳钢,其凝固温度区间较小,但液相线温度较高,过热度较小,流动性差,铸造性能不好。因此铸钢件在铸造后必须经过热处理,以消除组织缺陷。

### 1. 2. 3. 3 锻造工艺

在塑性变形中,处于奥氏体状态的钢,其强度低,塑性好,锻造性好。因此,都要把钢加热到高温单相 A 区进行塑性变形。但始锻温度不宜太高,以

### 1.2.3.5 热处理工艺

### 1.3 金属热处理基本概念

### 1.3.1 热处理概念

金属热处理是将固态金属或合金采用适当的方法进行加热、保温和冷却，获得所需要的组织结构与性能的工艺。热处理的基本工艺过程可用温度-时间关系曲线表示，如图 1-5 所示。钢加热和冷却时的温度变化曲线见图 1-6。

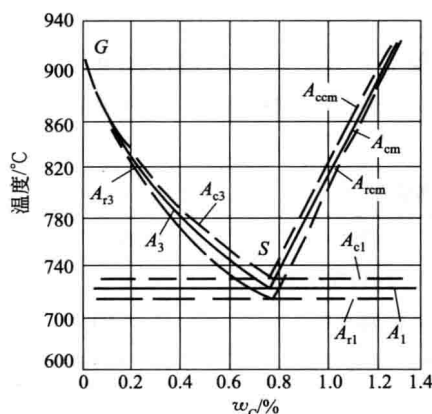


图 1-5 热处理工艺曲线图

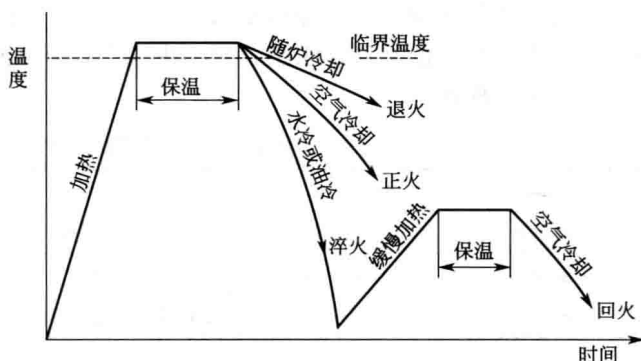


图 1-6 钢加热和冷却时的温度变化曲线

金属热处理可分为整体处理、表面热处理和化学热处理。整体处理包括退火、正火、淬火和回火等；表面热处理和化学热处理主要有表面淬火、渗碳和渗氮等工艺。

热处理可以用于消除上一工艺过程所产生的金属材料内部组织结构上的某些缺陷，改善切削性能，还可以进一步提高金属材料的性能，从而充分发挥材料性能的潜力。因此，大部分重要的机器零件都要进行热处理。

### 1.3.2 常用热处理方法

#### 1.3.2.1 退火

退火是将金属和合金加热到适当温度，保温一定时间，然后缓慢冷却的热处理工艺。根据钢的成分和性能要求的不同，退火可分为如下几种。

(1) **完全退火** 将铁碳合金完全奥氏体化，随之缓慢冷却，获得接近平衡状态组织的退火工艺。完全退火的目的是通过完全重结晶细化晶粒，降低硬度，改善切削性能。完全退火主要用于亚共析钢的铸、锻件。

(2) 球化退火 使钢件中碳化物球状化而进行的退火工艺。目的是使过共析钢中网状碳化物球状化,降低硬度,提高韧性,改善切削性能,为淬火作组织准备。

(3) 去应力退火 为了去除由于塑性变形加工、焊接等造成的以及铸件内存在的残余应力而进行的退火。主要用于消除铸件、锻件、焊接件和切削件的残余应力。

1.3.2.2 正火

正火是将钢材或钢件加热到  $A_{c3}$  或  $A_{ccm}$  以上  $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，保温适当的时间后，在静止空气中冷却的热处理工艺。把钢件加热到  $A_{c3}$  以上  $100\sim 150^{\circ}\text{C}$  的正火则称为高温正火。

正火的作用与退火类似，但正火时的冷却速率比退火快。同样的钢件在正火后的强度和硬度要比退火工件稍高，但消除残余应力不如退火彻底。因正火冷却较快、操作简便、生产率高，在可能的情况下应优先采用正火。低碳钢多采用正火代替退火。

1.3.2.3 淬火和回火

淬火是将钢件加热到  $A_{c3}$  或  $A_{c1}$  以上某一温度，保持一定时间，然后以适当的速率冷却获得马氏体和（或）贝氏体组织的热处理工艺。其目的在于提高钢件的硬度和耐磨性，通过淬火加不同回火以获得各种需要的性能，是钢的重要的强化方法。

工件淬火冷却时所用的介质叫作淬火介质。根据钢的种类不同淬火介质有所不同，常用的淬火介质有水 and 油两种。水便宜，冷却能力较强，一般碳素钢工件多用它作为淬火介质。油的冷却能力较水低、成本高，但是可防止工件产生裂纹等缺陷，合金钢多用油淬火。钢淬火后必须回火。

回火是钢件淬硬后，再加热至  $A_{c1}$  以下的某一温度，保温一定时间，然后冷却到室温的热处理工艺。其目的是稳定组织，减少内应力，降低脆性，获得所需性能。表 1-4 为常见的回火方法及其应用。

表 1-4 常见的钢的回火方法及其应用

| 回火方法 | 加热温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 力学性能特点    | 应用范围       | 硬度       |
|------|--------------------------|-----------|------------|----------|
| 低温回火 | 150~250                  | 高硬度、耐磨性   | 刀具、量具、冷冲模等 | 58~65HR  |
| 中温回火 | 350~500                  | 高弹性、韧性    | 弹簧、钢丝绳等    | 35~50HRC |
| 高温回火 | 500~650                  | 良好的综合力学性能 | 连杆、齿轮及轴类   | 20~30HRC |

1.3.2.4 表面淬火

表面淬火是仅对工件表层进行淬火的工艺。其目的是为了获得高硬度的表面层和有利的残余应力分布，提高工件的硬度和耐磨性。

表面淬火加热的方法很多，如感应加热、火焰加热、电接触加热、激光加热等，目前生产中最常用的是感应加热和火焰加热，如图 1-7、图 1-8 所示。

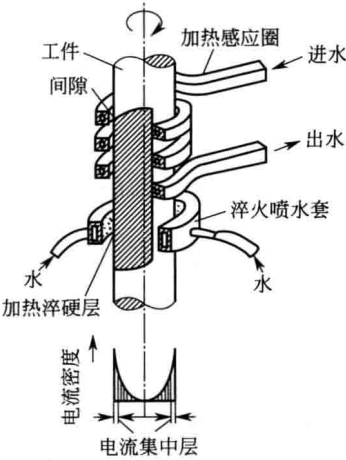


图 1-7 感应加热示意图

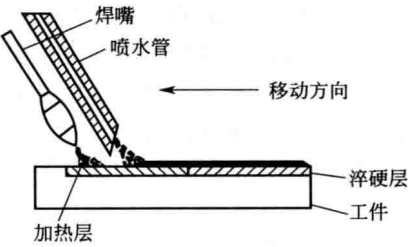


图 1-8 火焰加热示意图

火焰淬火是将工件表面用强烈的火焰（一般用氧-乙炔火焰）加热到淬火温度后，立刻喷水或浸水，使工件表面具有较高的硬度，心部仍具有原来的强度和韧性。火焰加热表面淬火工艺不受工件体积大小的限制，而且所需设备简单，成本低。但是淬火效果不稳定，工件表面的质量不易保证。

感应淬火是利用工件在交变磁场中产生感应电流，将表面加热到淬火温度后立刻快速冷却的热处理方法。感应加热表面淬火生产率高，淬火层厚度也易于控制，可以使全部淬火过程机械化、自动化。但是感应加热表面淬火设备价格较高，对不同工件都需要相适应的感应器，因此它仅适用于形状简单、生产批量大的工件的表面热处理，如螺栓、轴颈、齿轮等工件的表层淬火。

激光淬火是利用高功率密度的激光束扫描工件表面，将其迅速加热到相变温度以上，然后依靠零件本身的“潜冷”吸热，来实现快速冷却淬火。

激光淬火比常规淬火的表面硬度高 15%~20%，可显著提高钢的耐磨性，表面淬硬层造成较大的压应力有助于疲劳强度的提高，同时工件变形小、工件表面清洁、工艺操作简单，因此发展十分迅速。

### 1.3.3 化学热处理

化学热处理是将金属和合金工件置于一定温度的活性介质中保温，使一种或几种元素渗入它的表层，以改变其化学成分、组织和性能的热处理工艺。常用的化学热处理有渗碳、渗氮、碳氮共渗和渗金属元素等。

#### 1.3.3.1 渗碳

渗碳的方法主要有气体渗碳、液体渗碳和固体渗碳三种。气体渗碳如图 1-9 所示。将清洁后的钢件装入密封的井式气体渗碳炉中，加热至 900~950℃，通过气体渗碳剂（煤气、液化石油气等）进行渗碳。渗碳后可使工件表面 1~2mm 厚度内的含碳量提高到  $w_C=0.8\%\sim1.2\%$ ，渗碳工件材料一般为低碳钢或低合金钢。渗碳只改变工件表面的化学成分，为了提高工件表面的硬度和耐磨性，同时改善心部组织，渗碳后还需对工件进行淬火和低温回火处理。

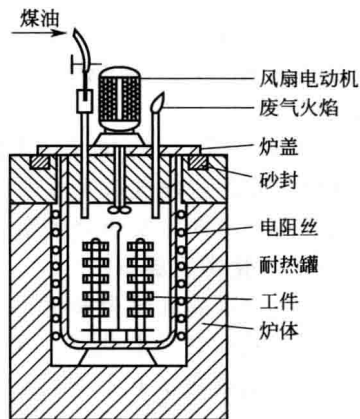


图 1-9 气体渗碳

#### 1.3.3.2 渗氮（氮化）

渗氮是在一定的温度下（一般在  $A_{c1}$  温度下）使活性氮原子渗入工件表面的化学热处理工艺。目前广泛应用的是气体渗氮或称气体氮化。氮化层深度一般不超过 0.6~0.7mm，氮化处理时工件的变形极小。渗氮的目的是提高表面硬度、耐磨性和疲劳强度。氮化层还具有较高的耐蚀性。

最典型的氮化用钢是 38CrMoAlA、35CrMo 钢，氮化后不需淬火。渗氮广泛用于精密齿轮、磨床主轴等重要精密零件。

#### 1.3.3.3 渗铝

它是指向工件表面渗入铝原子的过程。渗铝件具有良好的高温抗氧化能力，主要适用于石油、化工、冶金等方面的管道和容器。

#### 1.3.3.4 渗铬

渗铬是向工件表面渗入铬原子的过程。渗铬零件具有耐蚀、抗氧化、耐磨和较好的抗疲劳性能，兼有渗碳、渗氮和渗铝的优点。