

汽车制造新技术系列丛书



# 汽车制造工艺 与数控设备

周华祥 刘瑞已 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



汽车制造新技术系列丛书

# 汽车制造工艺与数控设备

周华祥 刘瑞已 主编



机械工业出版社

本书共分十三章：内容包括汽车制造过程及其零件制造中常用工程材料；制造工艺；加工质量；模具；数控机床；工件的定位和机床夹具；工艺规程的制定；装配工艺；结构工艺；汽车典型零件的制造工艺等。每章附有练习与思考题。

本书可作为高职高专院校相关专业学生专业教材，也可作为相关行业岗位人员培训教材或自学指导书，还可供汽车设计、制造部门的工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

汽车制造工艺与数控设备/周华祥, 刘瑞已主编. —北京: 机械工业出版社, 2007. 8

(汽车制造新技术系列丛书)

ISBN 978-7-111-21912-5

I. 汽… II. ①周…②刘… III. ①汽车—车辆制造—工艺②汽车—车辆制造—数控机床 IV. U466

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 109160 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 徐 巍 责任编辑: 高金生 版式设计: 冉晓华

责任校对: 李秋荣 封面设计: 鞠 杨 责任印制: 杨 曦

北京机工印刷厂印刷 (兴文装订厂装订)

2007 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 27.75 印张 · 688 千字

0 001—4 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-21912-5

定价: 49.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379771

封面无防伪标均为盗版

# · 前 言

本书是根据全国普通高等学校汽车类专业（方向）教材编审委员会确定的规划教材编写的。本着加强掌握基础理论，结合汽车制造特点，着重能力培养的指导思想，运用各学科的基本理论，从制造工艺的角度分析汽车制造过程，掌握汽车制造技术。

本书比较全面而系统地阐述了汽车生产工艺的基本理论，并具有一定的深度，而且力求使内容覆盖面广知识量大。介绍了在汽车制造中目前所使用的新材料技术（材料成形、粉末冶金），模具成形技术，数控机床加工技术等基础理论，以便指导读者在某个专业领域深入学习。

本书的内容具有全面的基础理论，有一定深度的专业技术水平，有目前先进的汽车制造技术。可作为汽车生产工艺的职业技术教育用书、汽车生产高管人员用书，也可作为高等职业技术学院汽车设计与制造、起重运输、工程机械等有关专业的教材，还可作为工程技术人员、技师等的参考书。

本书由湖南工业职业技术学院周华祥、刘瑞已主编，黎永强编写第二章；北京理工大学王雪红老师编写第三、四章；易宏彬编写第五、六章；杨军编写第七章；李平化编写第八、九章；刘瑞已编写第十、十一、十二章；周华祥编写第一、十三章。

本书在编写过程中，对在书中引用资料的作者表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，书中不可避免地会有缺点和错误，欢迎广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

## 第一篇 汽车制造加工工艺

|                           |     |                             |     |
|---------------------------|-----|-----------------------------|-----|
| <b>第一章 机械工程材料</b> .....   | 1   | <b>第八节 加工余量的确定</b> .....    | 126 |
| 第一节 金属材料的力学性能 .....       | 2   | <b>第九节 工序尺寸和公差的确定</b> ..... | 129 |
| 第二节 金属的晶体结构与结晶 .....      | 6   | <b>第十节 机械加工生产率和技术</b>       |     |
| 第三节 铁碳合金 .....            | 9   | 经济分析 .....                  | 137 |
| 第四节 钢的热处理 .....           | 13  | 练习与思考题 .....                | 144 |
| 第五节 碳素钢 .....             | 16  | <b>第四章 机床夹具</b> .....       | 147 |
| 第六节 合金钢 .....             | 18  | 第一节 机床夹具的分类及其组成 .....       | 148 |
| 第七节 铸铁 .....              | 22  | 第二节 常用定位元件和工件在夹具            |     |
| 第八节 有色金属与粉末冶金材料 .....     | 23  | 中的定位误差分析 .....              | 150 |
| 第九节 非金属材料 .....           | 27  | 第三节 工件的夹紧及夹紧装置 .....        | 169 |
| 练习与思考题 .....              | 30  | 第四节 典型机床夹具 .....            | 181 |
| <b>第二章 机械制造工艺基础</b> ..... | 32  | 第五节 夹具设计的方法和步骤 .....        | 191 |
| 第一节 铸造工艺基础 .....          | 33  | 练习与思考题 .....                | 193 |
| 第二节 锻压工艺基础 .....          | 48  | <b>第五章 机械加工质量控制</b> .....   | 196 |
| 第三节 冲压制造工艺 .....          | 60  | 第一节 概述 .....                | 197 |
| 第四节 焊接制造工艺 .....          | 66  | 第二节 工艺系统对加工误差的              |     |
| 练习与思考题 .....              | 88  | 影响 .....                    | 197 |
| <b>第三章 机械加工工艺</b> .....   | 90  | 第三节 工艺系统对加工表面粗糙度            |     |
| 第一节 概述 .....              | 91  | 的影响 .....                   | 205 |
| 第二节 机械加工工艺规程和工艺           |     | 第四节 加工误差的综合分析 .....         | 208 |
| 文件 .....                  | 97  | 第五节 提高加工精度的措施 .....         | 213 |
| 第三节 零件的工艺性分析 .....        | 102 | 练习与思考题 .....                | 215 |
| 第四节 毛坯选择 .....            | 104 | <b>第六章 汽车装配工艺过程制定</b> ..... | 216 |
| 第五节 基准与工件定位 .....         | 107 | 第一节 概述 .....                | 217 |
| 第六节 六点定位原则和定位基准           |     | 第二节 保证装配精度的装配方法 .....       | 218 |
| 的选择 .....                 | 110 | 第三节 装配工艺规程 .....            | 225 |
| 第七节 工艺路线的拟定 .....         | 116 | 第四节 汽车装配工艺过程 .....          | 229 |



|                           |     |                    |     |
|---------------------------|-----|--------------------|-----|
| 练习与思考题 .....              | 234 | 第四节 汽车车身装焊工艺 ..... | 272 |
| <b>第七章 汽车车身制造工艺</b> ..... | 236 | 第五节 汽车车身涂装工艺 ..... | 292 |
| 第一节 概述 .....              | 237 | 练习与思考题 .....       | 305 |
| 第二节 汽车车身冲压材料 .....        | 239 | <b>参考文献</b> .....  | 305 |
| 第三节 汽车车身覆盖件冲压工艺 ..        | 248 |                    |     |

## 第二篇 数控加工工艺与数控设备

### 第八章 数控加工工艺及数控设备

#### 基础 .....

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第一节 数控机床的产生及类型 .....          | 308 |
| 第二节 数控机床加工原理与数控<br>加工工艺 ..... | 311 |
| 第三节 数控机床的坐标系 .....            | 312 |
| 练习与思考题 .....                  | 314 |

### 第九章 数控刀具 .....

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 第一节 刀具的种类及特点 ..... | 316 |
| 第二节 数控刀具材料 .....   | 317 |
| 第三节 数控刀具的选择 .....  | 319 |
| 第四节 切削用量的确定 .....  | 321 |
| 第五节 数控工具系统 .....   | 324 |
| 练习与思考题 .....       | 327 |

### 第十章 数控车削加工工艺及数控

#### 车床的使用 .....

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第一节 概述 .....                 | 329 |
| 第二节 数控车削加工工件的装夹<br>及对刀 ..... | 333 |
| 第三节 数控车削加工工艺的<br>制定 .....    | 337 |
| 第四节 数控车削加工工艺路线的              |     |

#### 拟定 .....

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第五节 典型数控车削零件的加工工艺<br>分析 ..... | 350 |
| 练习与思考题 .....                  | 355 |

### 第十一章 数控铣削加工工艺 .....

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 第一节 数控铣削的主要加工对象 .. | 358 |
| 第二节 数控铣削加工工艺的制定 .. | 359 |
| 第三节 典型零件的加工工艺分析 .. | 375 |
| 练习与思考题 .....       | 382 |

### 第十二章 加工中心加工工艺 .....

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 第一节 概述 .....                   | 384 |
| 第二节 加工中心加工工艺要解决<br>的主要问题 ..... | 390 |
| 第三节 典型零件的加工工艺分析 ..             | 405 |
| 练习与思考题 .....                   | 411 |

### 第十三章 汽车典型零件的制造工艺 ..

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 第一节 齿轮制造工艺 .....   | 414 |
| 第二节 连杆制造工艺 .....   | 420 |
| 第三节 曲轴制造工艺 .....   | 425 |
| 第四节 箱体零件制造工艺 ..... | 429 |
| 练习与思考题 .....       | 436 |

#### 参考文献 .....

# 第一篇 汽车制造加工工艺

第

一

章

## 机械工程材料

### 学习目标

- ☒ 能认识金属的晶体结构特征，能从金属的晶体结构研究材料的性能；
- ☒ 了解铁碳合金的化学成分、组织状态和性能之间的关系；
- ☒ 熟悉和掌握碳钢、合金钢、铸铁以及有色金属的牌号、性能与应用知识；
- ☒ 熟悉和掌握钢的常用热处理工艺过程及其在机械加工中的工艺位置；
- ☒ 了解非金属材料种类、特点和应用；
- ☒ 综合掌握各种工程材料的性能，正确选用工程材料。



## 第一节 金属材料的力学性能

金属材料性能包括使用性能和工艺性能。使用性能是指金属材料在使用过程中应具备的性能,它包括力学性能(强度、塑性、硬度、冲击韧性、疲劳强度等)、物理性能(密度、熔点、热膨胀性、导热性、导电性等)和化学性能(耐蚀性、抗氧化性等)。工艺性能是金属材料从冶炼到成品的生产过程中,适应各种加工工艺(如冶炼、铸造、冷热压力加工、焊接、切削加工、热处理等)应具备的性能。

### 一、强度和塑性

#### 1. 强度

强度是指金属材料在载荷作用下,抵抗塑性变形和断裂的能力。

(1) 抗拉强度 金属材料在拉伸载荷作用下产生屈服变形中所能承受的最大应力称为抗拉强度,用符号  $R_m$  表示,即

$$R_m = \frac{F_m}{A_0}$$

式中  $F_m$ ——试样产生屈服变形中所能承受的最大力(N);

$A_0$ ——试样原始横截面积( $\text{mm}^2$ )。

(2) 屈服强度 根据国家标准 GB/T228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》,金属材料屈服前第一个峰值力(第一个极大值)判为上屈服力  $PS1$ ,不管其后的峰值力比它大或小。对应强度为上屈服强度  $R_{eH}$ ,为

$$R_{eH} = \frac{PS1}{A_0}$$

式中  $PS1$ ——试样屈服时的载荷,前第一个峰值力(第一个极大值)(N);

$A_0$ ——试样原始横截面积( $\text{mm}^2$ )。

金属材料屈服过程中,屈服阶段曲线中如呈现两个或两个以上的谷值力,舍去第一个谷值力(第一个极小值力),取其余谷值中力中之最小者判为下屈服力。如只呈现一个下降谷值力,此谷值力判为下屈服力。屈服阶段中呈现屈服平台,平台力判为下屈服力。如呈现多个而且后者高于前者的屈服平台,判第一个平台力为下屈服力  $PS2$ 。对应强度为下屈服强度  $R_{eL}$  为

$$R_{eL} = \frac{PS2}{A_0}$$

式中  $PS2$ ——试样屈服时的载荷,舍去第一个谷值力(第一个极小值力),取其余谷值中力中之最小者的屈服力(N);

$A_0$ ——试样原始横截面积( $\text{mm}^2$ )。

#### 2. 塑性

金属材料在载荷作用下,产生塑性变形而不被破坏的能力称为塑性。常用的塑性指标有断后伸长率  $A$  和断面收缩率  $Z$ 。

(1) 断后伸长率 试样拉断后,标距长度的增加量与原标距长度的百分比,称为断后





伸长率，用  $A$  表示，即

$$A = \frac{Lu - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中  $L_0$ ——试样原标距长度 (mm)；

$Lu$ ——试样拉断后标距长度 (mm)。

(2) 断面收缩率 试样拉断后，标距横截面积的缩减量与原横截面积的百分比，称为断面收缩率，用  $Z$  表示，即

$$Z = \frac{S_0 - Su}{S_0} \times 100\%$$

式中  $S_0$ ——试样原横截面积 ( $\text{mm}^2$ )；

$Su$ ——试样拉断后最小横截面积 ( $\text{mm}^2$ )。

$A$ 、 $Z$  是衡量材料塑性变形能力大小的指标， $A$ 、 $Z$  值越大表示材料塑性好，既能保证压力加工的顺利进行，又保证零件工作时的安全可靠。塑性好的材料不仅能顺利地进行锻造、轧制等成形工艺，而且在使用时如果超载，能够产生塑性变形，可以避免突然断裂。

### 3. 金属材料的强度和塑性的试验

(1) 拉伸试样 拉伸试样的形状通常有圆柱形和板状两类。图 1-1 所示为圆柱形拉伸试样，在圆柱形拉伸试样中  $d_0$  为试样直径， $L_0$  为试样的标距长度，根据标距长度和直径之间的关系，试样可分为长试样 ( $L_0 = 10d_0$ ) 和短试样 ( $L_0 = 5d_0$ )。

(2) 拉伸曲线 试验时，将试样两端夹装在试验机的上下夹头上，随后缓慢地增加载荷，随着载荷的增加，试样逐步变形伸长，直到被拉断为止。在试验过程中，试验机自动记录了每一瞬间载荷  $F$  和变形量  $\Delta L$ ，并给出了它们之间的关系曲线，称为拉伸曲线（或拉伸图）。图 1-2 为低碳钢的拉伸曲线，在拉伸的开始阶段，试样产生弹性变形， $0-a$  近似为一直线。当载荷超过  $b$  后，试样将进一步伸长，但此时若卸除载荷，弹性变形消失后，有一部分变形不能消失，即试样不能恢复到原来的长度，称为塑性变形或永久变形。当载荷增加到  $c$  时，试样开始明显地塑性变形，在拉伸曲线上出现了水平的或锯齿形的线段，这种现象称为屈服。

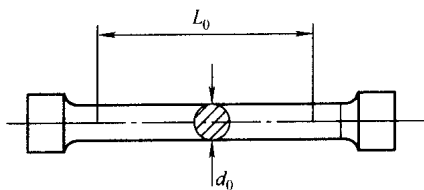


图 1-1 圆柱形拉伸试样

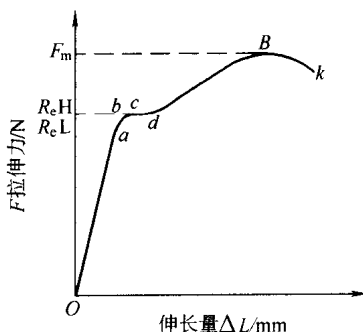


图 1-2 低碳钢拉伸曲线

当载荷继续增加到某一最大值  $F_m$  时，变形集中发生在试样的局部，产生了颈缩现象。由于试样局部截面的逐渐减少，载荷也逐渐降低，当达到拉伸曲线上的  $k$  点时，试样就被拉断。



## 二、硬度

硬度是衡量金属材料软硬程度的指标。它是指金属表面抵抗局部塑性变形的能力，是检验毛坯或成品件、热处理件的重要性能指标。此外，硬度还与金属材料的耐磨性和某些工艺性能有关。目前生产上应用最广的硬度指标有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度。

### 1. 布氏硬度

布氏硬度试验原理如图 1-3 所示，它是用一定直径的钢球或硬质合金球，以相应的试验力压入试样表面，经规定的保持时间后，卸除试验力，用读数显微镜测量试样表面的压痕直径，通过查表或计算得到硬度值。布氏硬度用符号 HBW 表示，HBW 之前为硬度值。布氏硬度试验的优点是：测出的硬度值准确可靠，因压痕面积大，能消除因组织不均匀引起的测量误差。布氏硬度试验的缺点是：压痕大，不适宜测量成品件硬度，也不宜测量薄件硬度；测量速度慢，测得压痕直径后还需计算或查表。

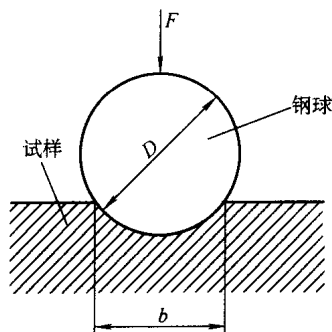


图 1-3 布氏硬度测定原理

### 2. 洛氏硬度

洛氏硬度的测定是在洛氏试验机上进行的，它是以顶角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥体或直径为  $1.5875\text{mm}$  的淬火钢球做压头，以规定的试验力使其压入试样表面，根据压痕的深度确定被测金属的硬度值。洛氏硬度测定的原理如图 1-4 所示，其有效值范围是  $20 \sim 67\text{HRC}$ 。

洛氏硬度是在洛氏硬度试验机上进行的，其硬度值可直接从表盘上读出。洛氏硬度符号 HR 前面的数字为硬度值，后面的字母表示级数。如  $60\text{HRC}$  表示 C 标尺测定的洛氏硬度值为 60。洛氏硬度试验操作简便、迅速、效率高，可以测定软、硬金属的硬度，压痕小，可用于成品检验。由于压痕小，测量组织不均匀的金属硬度时，重复性差，而且不同的洛氏硬度标尺测得硬度值无法比较。

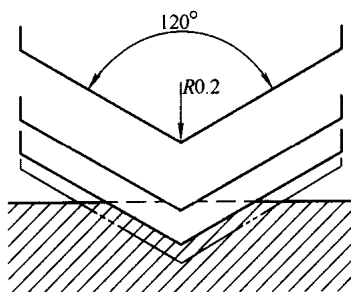


图 1-4 洛氏硬度测定原理

### 3. 维氏硬度

维氏硬度试验原理与布氏硬度相同，同样是根据压痕单位面积上所受的平均载荷计量硬度值，不同的是维氏硬度的压头采用金刚石制成的锥面夹角为  $136^\circ$  的正四棱锥体。试验时，根据试样大小、厚薄，选用适当载荷压入试样表面，保持一定时间后去除载荷，用附在试验机上测微计测量压痕对角线长度  $d$ ，然后通过查表得到维氏硬度。维氏硬度符号 HV 前是硬度值，符号 HV 后附以试验载荷。如  $640\text{HV}_{30/20}$  表示在  $30 \times 9.8\text{N}$  力作用下保持 20s 后测得的维氏硬度值为  $640\text{HV}$ 。维氏硬度的优点是试验时加载小，压痕深度浅，可测量零件表面淬硬层，测量对角线长度  $d$  误差小，其缺点是生产率比洛氏硬度试验低，不宜于成批生产检验。

## 三、冲击韧度

生产中许多机器零件，都是在冲击载荷（载荷以很快的速度作用于机件）下工作。试验表明载荷速度增加，材料的塑性、韧性下降，脆性增加，易发生突然性破断。因此，使用



的材料就不能用静载荷下的性能来衡量，而必须用抵抗冲击载荷的作用而不破坏的能力，即冲击韧度  $a_k$  来衡量， $a_k$  值越大表示材料的韧性越好。

测量冲击韧度  $a_k$  目前应用最普遍的是摆锤冲击试验，将标准试样放在冲击试验机的两支座上，使试样缺口背向摆锤冲击方向（见图 1-5），然后把质量为  $m$  的摆锤提升到  $h_1$  高度，摆锤由此高度下落时将试样冲断，并升到  $h_2$  高度。因此冲断试样所消耗的功为

$$a_k = mg (h_1 - h_2)$$

金属的冲击韧度  $a_k$  ( $J/cm^2$ ) 就是冲断试样时在缺口处单位面积所消耗的功。

$a_k$  值可从试验机的刻度盘上直接读出。 $a_k$  值的大小，代表了材料的冲击韧度高低。材料的冲击韧度值除了取决于材料本身之外，还与环境温度及缺口的状况密切相关。所以，冲击韧度除了用来表征材料的韧性大小外，还用来测量金属材料随环境温度下降由塑性状态变为脆性状态的冷脆转变温度，也用来考查材料对于缺口的敏感性。

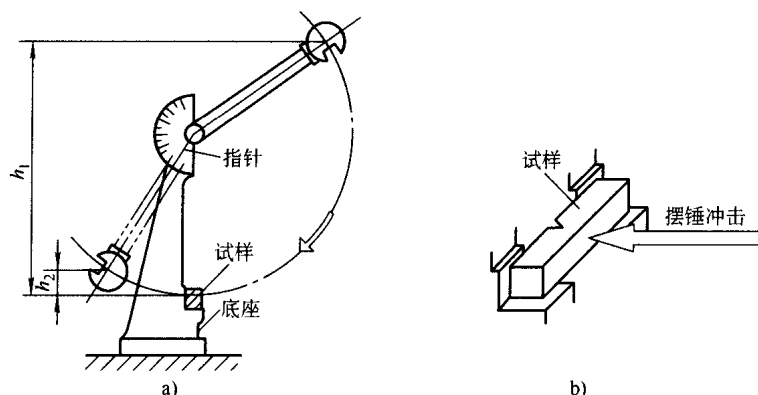


图 1-5 冲击试验原理

#### 四、疲劳强度

许多机械零件是在交变应力作用下工作的，如轴类、弹簧、齿轮、滚动轴承等。虽然零件所承受的交变应力数值小于材料的屈服强度，但在长时间运转后也会发生断裂，这种现象叫疲劳断裂。它与静载荷下的断裂不同，断裂前无明显塑性变形，因此，具有更大的危险性。材料的抗疲劳性用疲劳极限衡量，当应力低于某一值时，即使循环次数无穷多也不发生断裂，此应力值称为疲劳强度或疲劳极限。在疲劳强度的测定中，不可能把循环次数做到无穷大，而是规定一定的循环次数作为基数。常用钢材的循环基数为  $10^7$  次，有色金属和某些超高强度钢的循环基数为  $10^8$  次。

疲劳破断常发生在金属材料最薄弱的部位，如热处理产生的氧化、脱碳、过热、裂纹部位；钢中的非金属夹杂物、试样表面有气孔或划痕等缺陷均会产生应力集中，使疲劳强度下降。为了提高疲劳强度，加工时要降低零件的表面粗糙度值和进行表面强化处理，如表面淬火、渗碳、氮化、喷丸等处理手段都可以提高工件的疲劳强度。



## 第二节 金属的晶体结构与结晶

金属材料的力学性能与金属内部的组织结构有着密切的关系,金属材料的性能是它的内部组织结构的外在表现,要掌握金属材料的性能变化,必须了解金属的内部组织结构及形成过程。

### 一、金属的晶体结构

#### 1. 晶体结构的基本概念

晶体是指其组成微粒(原子、分子或离子)在空间作有规律排列的固态物质。固态金属一般为晶体,晶体原子结构如图 1-6a 所示。

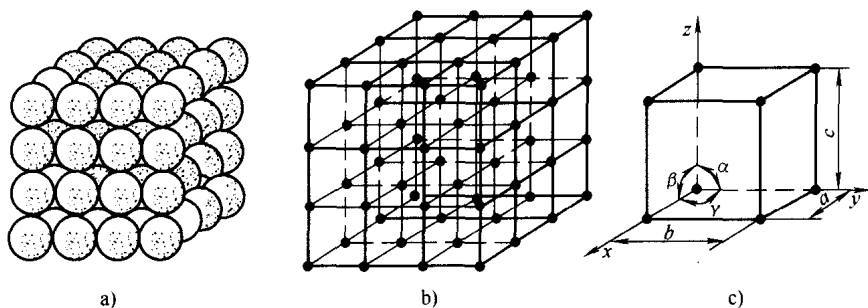


图 1-6 金属晶体结构示意图

a) 圆球模型 b) 晶格 c) 晶胞

为了描述原子在空间的排列规则,常用假想的线条把各原子中心连接起来,可以得到一个空间格子,称为晶格,如图 1-6b 所示。从晶格中选取一个能够代表晶格特征的最小几何单元,称之为晶胞,图 1-6c 所示,是一个简单立方晶格的晶胞示意图。晶胞在空间的重复排列构成整个晶格。晶胞的特征可以反映出晶格和晶体的特征。在晶体学中,用来描述晶胞大小与形状的几何参数称为晶格常数,包括晶胞的三个棱边  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和三个棱边夹角  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 。

#### 2. 常见金属的晶体结构

(1) 体心立方晶格 体心立方晶格如图 1-7a 所示,在晶胞的八个角上各有一个金属原子,构成立方体。在立方体的中心还有一个原子,叫做体心立方晶格。属于这类晶格的金属有铬、钒、钨、钼和铁( $\alpha$ -Fe)等。

(2) 面心立方晶格 面心立方晶格如图 1-7b 所示,在晶胞的八个角上各有一个原子,构成立方体。在立方体的六个面的中心各有一个原子,所以叫做面心立方晶格。属于这类晶格的金属有铝、铜、镍、铅和铁( $\gamma$ -Fe)等。

(3) 密排六方体晶格 密排六方体晶格如图 1-7c 所示,在晶胞的 12 个角上各有一个原子,构成六方柱体。上下底面中心各有一个原子,晶胞内部还有三个原子。具有这种晶格的常见金属有镁、锌、铍等。

金属由于晶格类型和晶格常数不同,便呈现出不同的物理、化学和力学性能,金属晶体结构的变化会引起其性能发生变化。

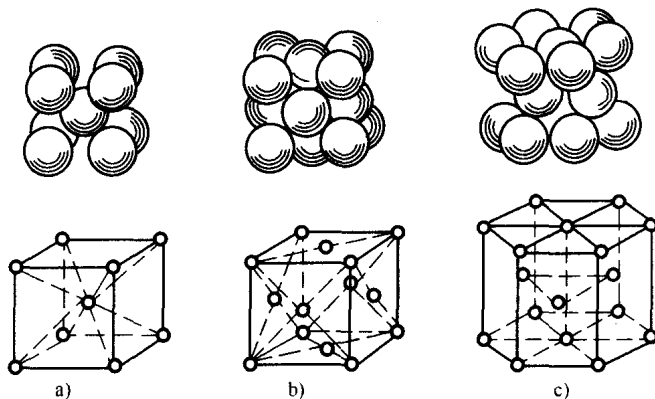


图 1-7 常见的金属晶格类型

a) 体心立方晶格 b) 面心立方晶格 c) 密排六方体晶格

## 二、金属的结晶

金属的结晶是指金属从液态转变为固态晶体的过程，了解金属的结晶过程和规律，对于改善金属材料的组织和性能具有重要的意义。下面以纯金属为例进行介绍：

### 1. 纯金属的结晶

纯金属由液态向固态的冷却过程，可用冷却过程中所测得的温度与时间的关系曲线，即冷却转变曲线来表示，这种方法称热分析法，所测得的结晶温度称为理论结晶温度  $T_0$ 。金属在结晶时，由于释放大量的结晶潜热，补偿了热量的散失，故结晶在一个恒定的温度下进行。在实际生产中，液态纯金属冷却时，具有一定冷却速度。有时冷却速度很大，在这种情况下，纯金属的结晶过程是在  $T_1$  温度进行的，如图 1-8 所示， $T_1$  低于  $T_0$ ，这种现象称为“过冷”。理论结晶温度  $T_0$  与实际结晶温度  $T_1$  之差称为“过冷度”。过冷度并不是一个恒定值，液体金属的冷却速度越大，实际结晶温度  $T_1$  就越低，即过冷度就越大。实际金属总是在过冷情况下进行结晶的，过冷是金属结晶的一个必要条件。

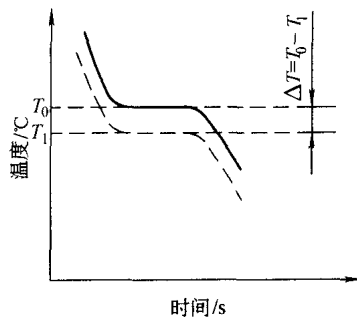


图 1-8 纯金属冷却曲线

### 2. 金属的结晶过程

液态纯金属在冷却到结晶温度时，其结晶过程是首先晶核不断长大，同时继续产生新的晶核，直到全部液体转变成固体为止。最后形成由外形不规则的许多小晶体所组成的多晶体，如图 1-9 所示。

### 3. 结晶时细化晶粒的措施

一般情况下细晶粒金属比粗晶粒金属具有较高的强度、硬度、塑性和韧性。从金属的结晶过程可知，要使晶粒细小，关键是要增加金属液体中的晶核数量，生产中常采用以下方法细化晶粒：

(1) 增加过冷度 增加过冷度能使晶核形成速度大于其长大速度，使晶核数量相对增多。增加过冷度，就是要提高金属凝固的冷却转变速度。

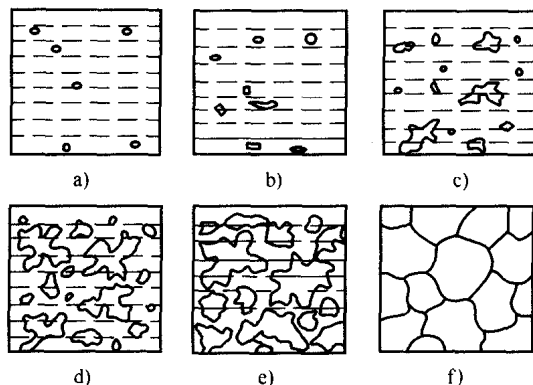


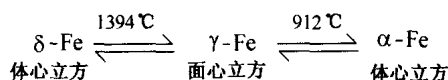
图 1-9 金属结晶过程示意图

(2) 进行变质处理 变质处理是在浇注前向液态金属中加入一些细小的难熔的物质(变质剂),在液相中起附加晶核的作用,使形核率增加,晶粒显著细化。如往钢液中加入钛、锆、铝等。

(3) 附加振动 金属结晶时,利用机械振动、超声波振动、电磁振动等方法,既可使正在生长的枝晶熔断成碎晶而细化,又可使破碎的枝晶尖端起晶核作用,以增加形核率。

### 三、金属的同素异构转变

有些金属在固态时具有几种晶格类型,随温度的变化,其晶格类型会发生改变。在固态下,金属的晶格类型随温度而发生的改变,称为同素异构转变。在生产上,纯铁的同素异构转变具有十分重要的意义。其转变情况如图 1-10 所示,铁有两次同素异构转变,转变过程如下:



同素异构转变是钢铁的一个重要特性,它是钢铁能够进行热处理的理论依据。同素异构转变是通过原子的重新排列来完成的,这一过程有如下特点:

(1) 同素异构转变是由晶核的形成和长大过程完成的,新晶核优先在晶界处形成。

(2) 同素异构转变时有过冷现象,具有较大的过冷度同素异构转变过程中,有结晶潜热产生,在冷却曲线上出现水平线段,但这种转变是在固态下进行的,它与液体结晶不同。

(3) 同素异构转变时常伴有金属的体积变化。

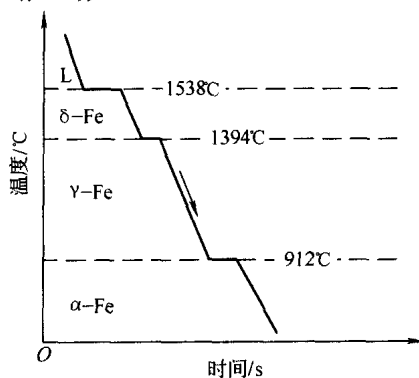


图 1-10 纯铁的同素异构转变

### 四、晶体缺陷

在实际的金属晶体中,由于结晶条件和压力加工等因素的影响,存在大量原子排列不规则的区域,称为晶体缺陷。晶体缺陷的存在对金属的性能有着很大的影响。这些晶体缺陷分



为点缺陷、线缺陷和面缺陷三大类。

### 1. 点缺陷

最常见的点缺陷是空位和间隙原子，晶格发生畸变，引起金属性能的变化，如图 1-11 所示。

### 2. 线缺陷

晶体中的线缺陷通常是各种类型的位错，位错就是晶体中的某处有一列或多列原子发生了某种有规律的错排现象。这种错排有许多类型，其中比较简单的一种形式就是刃型位错，如图 1-12 所示。在晶面  $ABCD$  的上方，多出了一个垂直方向的晶面  $EFGH$ ，使晶体上下两部分沿着  $EF$  线产生原子错排现象， $EF$  线就称为位错线。

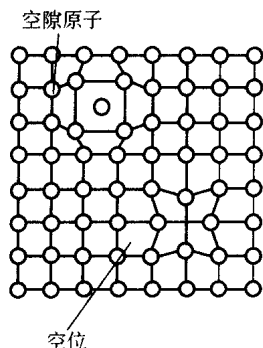


图 1-11 点缺陷

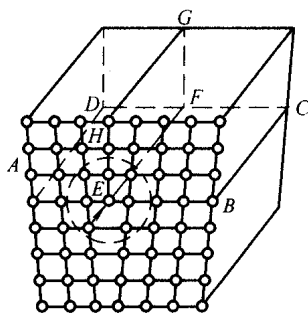


图 1-12 线缺陷

### 3. 面缺陷

晶界就是一种常见的面缺陷。由于相邻晶粒间的晶格位向显著不同，故晶界处的原子不可能规则，如图 1-13 所示。每一种晶体缺陷都会使缺陷处的晶格产生畸变，晶格畸变使晶体塑性变形抗力增加，导致金属材料强度和硬度提高。

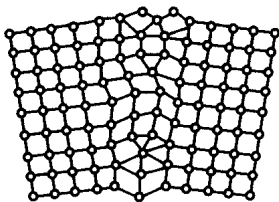


图 1-13 面缺陷

## 第三节 铁碳合金

铁碳合金是以铁和碳为主要组成元素的合金，是机械工程中应用最广泛的金属材料，不同成分的铁碳合金在不同温度下具有不同的组织，各方面性能也有所不同。

### 一、合金的相结构

#### 1. 合金的基本概念

合金是由两种或两种以上的金属元素或金属与非金属组成的具有金属特性的物质。例如，碳钢是铁和碳组成的合金。



组成合金的最基本的、独立的物质称为组元，简称为元。例如，铜和锌就是黄铜的组元。有时稳定的化合物也可以看作为组元，例如，铁碳合金中的  $\text{Fe}_3\text{C}$  就可以看作为组元。由两个组元组成的合金称为二元合金，由三个组元组成的合金称为三元合金。合金中具有同一化学成分和晶体构造的组成部分称为相，相与相之间具有明显的界面。通常把合金中相的晶体结构称为相结构，而把在金相显微镜下观察到的具有某种形态或形貌特征的组成部分总称为组织。合金中的各种相是组成合金的基本单元，合金组织则是合金中各种相的综合体。

## 2. 合金的相结构

根据构成合金的各组元之间相互作用的不同，固态合金的相结构可分为固溶体和金属化合物两大类。

(1) 固溶体 合金在固态下，组元间互相溶解而形成的均匀相，称为固溶体。形成固溶体后，晶格保持不变的组元称为溶剂，晶格消失的组元称为溶质。固溶体的晶格类型与溶剂组元相同。根据溶质原子在溶剂晶格中所占据位置的不同，固溶体分为置换固溶体和间隙固溶体两种。

1) 置换固溶体 溶质原子代替溶剂原子占据溶剂晶格中的某些结点位置而形成的固溶体，称为置换固溶体，如图 1-14 所示。置换固溶体可分为有限固溶体和无限固溶体两类。形成置换固溶体时，溶质原子在溶剂晶格中的溶解度主要取决于两者晶格类型、原子直径的差别和它们在周期表中的相互位置。

2) 间隙固溶体 溶质原子分布于溶剂的晶格间隙中所形成的固溶体称为间隙固溶体，如图 1-15 所示。间隙固溶体只能形成有限固溶体。

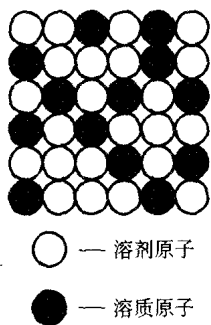


图 1-14 置换固溶体

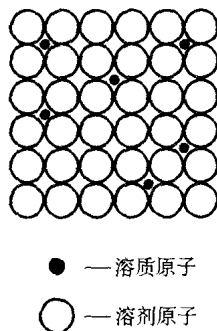


图 1-15 间隙固溶体

3) 固溶体的性能 由于溶质原子的溶入，固溶体产生晶格畸变，溶质浓度越高，晶格畸变越严重。晶格畸变导致固溶体变形抗力增大，强度、硬度升高，这种现象称为固溶强化。它是强化金属材料的重要途径之一。

(2) 金属化合物 金属化合物是合金组元间发生相互作用而生成的一种新相，其晶格类型和性能不同于其中任一组元，又因它具有一定的金属性质，故称金属化合物，如碳钢中的  $\text{Fe}_3\text{C}$ 。金属化合物具有复杂的晶体结构，熔点较高，硬度高，而脆性大。合金中存在金属化合物时，将使合金的强度、硬度及耐磨性明显提高。金属化合物在合金中常作为强化相存在，它是许多合金钢、有色金属和硬质合金的重要组成相。

## 3. 机械混合物

纯金属、固溶体、金属化合物均是组成合金的基本相。由两相或两相以上组成的多相均





匀组织称为机械混合物。在机械混合物中各组成相仍保持着原有晶格类型和性能，而整个机械混合物的性能介于各组成相性能之间，与各组成相的数量、形状、大小和分布情况密切相关。在机械工程中使用的合金材料绝大多数都是机械混合物这种组织状态。

## 二、铁碳合金的基本组织

铁碳合金在液态时铁和碳可以无限互溶，在固态时根据碳的质量分数不同，碳可以溶解在铁中形成固溶体，也可以与铁形成化合物，或者形成固溶体与化合物组成的机械混合物。铁碳合金的组织比较复杂，并且随着铁碳合金成分和温度的变化而改变。铁碳合金的组织由以下几种基本相组成：

### 1. 铁素体

碳溶于  $\alpha$ -Fe 中形成的间隙固溶体称为铁素体，常用符号 F 表示。铁素体仍保持  $\alpha$ -Fe 的体心立方晶格，碳溶于  $\alpha$ -Fe 的晶格间隙中。由于体心立方晶格原子间的空隙较小，碳在  $\alpha$ -Fe 中的溶解度也较小，在 727℃ 时，溶碳能力最大，为  $w_c = 0.0218\%$ ，随着温度降低， $\alpha$ -Fe 中的碳的质量分数逐渐减少，在室温时降到  $w_c = 0.0008\%$ 。铁素体的力学性能与工业纯铁相似，即塑性、韧性较好，强度、硬度较低。

### 2. 奥氏体

碳溶于  $\gamma$ -Fe 中形成的间隙固溶体称为奥氏体，用符号 A 表示。奥氏体仍保持  $\gamma$ -Fe 的面心立方晶格。由于面心立方晶格间隙较大，故奥氏体的溶碳能力较强。在 1148℃ 时溶碳能力为最大，即  $w_c = 2.11\%$ ，随着温度下降， $\gamma$ -Fe 中的碳的质量分数逐渐减少，在 727℃ 时碳的  $w_c$  为 0.77%。奥氏体是一个硬度较低、塑性较高的相，适用于锻造。绝大多数钢热成形要加热到奥氏体状态进行加工，奥氏体无磁性。

### 3. 渗碳体

铁与碳形成的金属化合物  $Fe_3C$  称为渗碳体，用  $Fe_3C$  表示。渗碳体中的碳的质量分数  $w_c = 6.69\%$ ，熔点为 1227℃，是一种具有复杂晶格结构的金属化合物。渗碳体的硬度很高，但塑性和韧性几乎等于零。渗碳体是钢中主要强化相，在铁碳合金中存在形式有：粒状、球状、网状和细片状。其形状、数量、大小及分布对钢的性能有很大的影响。

### 4. 珠光体

珠光体是由铁素体和渗碳体组成的机械混合物，用符号 P 表示。在珠光体中，渗碳体以片状分布在铁素体基体上。由于渗碳体的强化作用，珠光体具有较高的强度 ( $R_m$  约为 760MPa)，一定的硬度 (180HBW)、塑性和韧性。

### 5. 莱氏体

莱氏体是奥氏体和渗碳体组成的机械混合物，用符号 Ld 表示，是渗碳体转变的产物。莱氏体缓冷到 727℃ 时，其中奥氏体将转变为珠光体，因此 727℃ 以下的莱氏体由珠光体和渗碳体组成，称为低温莱氏体，用符号 Ld' 表示。莱氏体因含有大量的渗碳体，力学性能与渗碳体相近，硬度高、脆性大。

## 三、Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图

铁碳合金相图是表示在极缓慢冷却（或加热）条件下，不同化学成分的铁碳合金，在不同温度下所具有的组织状态的一种图形。它对于钢铁材料的使用，对于钢铁材料的热处理