

GONGCHENG CAILIAO JI CHENGXING JISHU

# 工程材料及成形技术

宋绪丁 刘敏嘉 主编



人民交通出版社

China Communications Press

3  
0

华北水利水电学院图书馆



207119508

TB3

L650

内容摘要

GONGCHENG CAILIAO JI CHENGXING JISHU

# 工程材料及成形技术

宋绪丁 刘敏嘉 主编

图例 (CIP) 目録

工... 材料... 成形... 技术... 宋绪丁 刘敏嘉 主编



TB3

L650

人民交通出版社

711950

## 内 容 简 介

本书为高等工科院校机械类各专业的技术基础课教材,主要阐述工程中常用的金属材料、粉末冶金材料、工程塑料和工业陶瓷等的分类、成分、组织或结构、性能特点及其应用,着重介绍了上述材料的成形原理、方法、成形工艺特点及其应用。本书还对各种成形方法和零件结构工艺性的要求进行了分析。

本书可作为高等工科院校机械类各专业的教材,亦可作为职工大学、成人大学、广播电视大学的专业基础课教材和工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

工程材料及成形技术/宋绪丁,刘敏嘉主编. —北京:  
人民交通出版社,2003.1  
ISBN 7-114-04547-6

I. 工... II. ①宋...②刘... III. ①工程材料-高  
等学校-教材②机械制造工艺-高等学校-教材  
IV. ①TB3②TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 107864 号

## 工程材料及成形技术

宋绪丁 刘敏嘉 主编

正文设计: 彭小秋 责任校对: 戴瑞萍 责任印制: 张 恺

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京市密东印刷有限公司印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 11 字数: 264 千

2003 年 1 月 第 1 版

2003 年 2 月 第 1 版 第 2 次印刷

印数: 3001—5000 册 定价: 16.80 元

ISBN 7-114-04547-6

# 前 言

本书是根据国家教育部 1995 年“关于组织实施《面向 21 世纪高等工程教学内容和课程体系改革计划》的通知”精神,为机械类专业的“工程材料及机械制造基础”课程进行改革与建设而编写的一本探索性教材。该书被长安大学列为 2000 年重点课程建设和改革项目的系列教材之一。在编写过程中,编者结合多年教学实践经验,突出了以下特点:

1. 以“材料—成形方法—成形工艺—零件的结构工艺性”为主线,使得全书的层次分明、系统性增强。

2. 精简了金属材料及其成形技术(铸造、压力加工、焊接)的内容,增加了粉末冶金材料、工程塑料、陶瓷材料及其成形技术的内容。

3. 本书突出了材料的成形方法和成形工艺的基础知识,增加了典型零件的成形工艺分析,以培养学生分析和解决实际问题的能力。

4. 充实了新材料、新技术、新工艺等内容,以适应现代工业发展的需要。

5. 本书的适用面广,既适用于多学时(40 学时)讲授,也适用于少学时(20~30 学时)讲授。根据专业的情况,可以有选择的讲授。

参加本书编写的有张翔(第一章),刘敏嘉(第二章),宋绪丁(第三章、第六章),刘建柱(第四章),张长军(第五章、第七章)。全书由宋绪丁、刘敏嘉主编,西安理工大学蒋百灵教授和长安大学董大军副教授审阅。

在编写过程中,得到了长安大学教务处、教材供应中心、工程机械学院的大力支持,在此一并致谢!

由于水平有限,编写时间仓促,加上本书属于课程改革的探索性教材,因此书中难免会有不妥之处,恳请批评指正。

编 者  
2002 年 9 月于西安

# 目 录

## 第一章 金属材料与热处理

|                   |    |
|-------------------|----|
| 第一节 金属材料的主要性能     | 1  |
| 一、力学性能            | 1  |
| 二、物理、化学及工艺性能      | 3  |
| 第二节 金属的晶体结构与结晶    | 3  |
| 一、金属的晶体结构         | 4  |
| 二、纯金属的结晶          | 4  |
| 三、金属的同素异构转变       | 5  |
| 四、合金的结构与二元合金相图的概念 | 6  |
| 第三节 铁碳合金          | 7  |
| 一、铁碳合金的基本组织       | 7  |
| 二、铁碳合金相图分析        | 7  |
| 三、含碳量与合金力学性能的关系   | 10 |
| 第四节 金属材料热处理       | 11 |
| 一、热处理过程中钢的组织转变    | 11 |
| 二、钢的热处理工艺         | 12 |
| 三、钢的表面热处理         | 14 |
| 第五节 常用的金属材料       | 16 |
| 一、钢               | 16 |
| 二、有色金属及其合金        | 19 |
| 复习思考题             | 20 |

## 第二章 铸造成形技术

|             |    |
|-------------|----|
| 第一节 合金的铸造性能 | 22 |
| 一、合金的充型能力   | 22 |
| 二、合金的收缩     | 24 |
| 三、合金的吸气性    | 29 |
| 四、铸件常见的缺陷   | 30 |
| 第二节 常用的铸造合金 | 33 |
| 一、铸铁        | 33 |
| 二、铸钢        | 36 |
| 三、铸造有色合金    | 37 |
| 第三节 铸造工艺设计  | 39 |

|                   |    |
|-------------------|----|
| 一、砂型铸造的基本过程       | 39 |
| 二、铸造工艺图的绘制        | 41 |
| 第四节 铸造方法及选择       | 46 |
| 一、熔模铸造            | 46 |
| 二、金属型铸造           | 47 |
| 三、压力铸造            | 47 |
| 四、离心铸造            | 48 |
| 五、铸造方法的比较与合理选择    | 48 |
| 第五节 铸件的结构工艺性      | 49 |
| 一、合金的铸造性能对铸件结构的要求 | 49 |
| 二、铸造工艺对铸件结构的要求    | 53 |
| 三、铸造方法对铸造结构的要求    | 55 |
| 复习思考题             | 56 |

### 第三章 压力加工成形技术

|                   |    |
|-------------------|----|
| 第一节 压力加工方法        | 59 |
| 一、型材生产方法          | 59 |
| 二、机械零件的毛坯及成品生产    | 60 |
| 第二节 金属材料的塑性变形基础   | 61 |
| 一、金属塑性变形的实质       | 61 |
| 二、塑性变形对金属组织和性能的影响 | 62 |
| 三、金属材料的锻造性能       | 65 |
| 第三节 自由锻造          | 68 |
| 一、自由锻的特点          | 68 |
| 二、自由锻造工序          | 68 |
| 三、自由锻工艺规程的制定      | 70 |
| 四、自由锻件的结构工艺性      | 71 |
| 第四节 模型锻造和胎模锻造     | 72 |
| 一、锻模结构            | 72 |
| 二、模锻工艺规程的制定       | 73 |
| 三、模锻件结构的工艺性       | 76 |
| 四、胎模锻造            | 77 |
| 第五节 冲压            | 78 |
| 一、分离工序            | 78 |
| 二、变形工序            | 82 |
| 三、冲压件的结构设计        | 86 |
| 第六节 先进压力加工工艺简介    | 89 |
| 一、精密模锻            | 90 |
| 二、辊锻与辗压           | 90 |
| 三、超塑性成形           | 91 |



|         |    |
|---------|----|
| 四、高速锤成形 | 92 |
| 五、粉末锻造  | 93 |
| 复习思考题   | 94 |

#### 第四章 焊接成形技术

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 第一节 焊条电弧焊                 | 96  |
| 一、焊接电弧                    | 96  |
| 二、焊条电弧焊的工艺流程及特点           | 97  |
| 三、焊条电弧焊的冶金特点              | 97  |
| 四、电焊条及其选择原则               | 98  |
| 第二节 焊接接头的组织与性能            | 100 |
| 一、焊接接头金属组织与性能变化           | 100 |
| 二、影响热影响区的因素及改善焊接热影响区性能的方法 | 101 |
| 第三节 焊接应力与变形               | 102 |
| 一、焊接应力                    | 102 |
| 二、焊接变形                    | 103 |
| 第四节 金属材料的焊接性能             | 105 |
| 一、金属材料的焊接性                | 105 |
| 二、常用金属材料的焊接               | 106 |
| 第五节 其他焊接方法                | 108 |
| 一、埋弧焊                     | 108 |
| 二、气体保护焊                   | 109 |
| 三、电渣焊                     | 111 |
| 四、电阻焊                     | 111 |
| 五、摩擦焊                     | 113 |
| 六、钎焊                      | 113 |
| 七、等离子弧焊接与切割               | 114 |
| 八、电子束焊接                   | 115 |
| 第六节 焊接结构工艺设计              | 115 |
| 一、焊接结构材料的选择               | 115 |
| 二、焊接方法的选择                 | 116 |
| 三、焊接接头的工艺设计               | 117 |
| 四、焊接结构分析实例                | 120 |
| 复习思考题                     | 121 |

#### 第五章 粉末冶金及其成形技术

|              |     |
|--------------|-----|
| 第一节 粉末冶金材料   | 123 |
| 一、金属粉末性能     | 123 |
| 二、金属粉末的制备    | 124 |
| 三、金属粉末的筛分与混合 | 125 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 四、粉末冶金材料的应用 .....      | 125 |
| 第二节 粉末冶金工艺过程 .....     | 127 |
| 一、成形前的原料预处理 .....      | 128 |
| 二、金属粉末压制成形 .....       | 128 |
| 三、烧结 .....             | 129 |
| 四、后处理 .....            | 130 |
| 五、粉末冶金模具 .....         | 131 |
| 第三节 粉末冶金制品的结构工艺性 ..... | 133 |
| 复习思考题 .....            | 135 |

## 第六章 工程塑料及其成形技术

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第一节 工程塑料 .....         | 136 |
| 一、高分子化合物 .....         | 136 |
| 二、工程塑料的组成 .....        | 139 |
| 三、工程塑料的分类和性能 .....     | 140 |
| 四、常用的工程塑料 .....        | 142 |
| 第二节 工程塑料的成形技术 .....    | 142 |
| 一、塑料成形的工艺性能 .....      | 143 |
| 二、注射成形及其工艺条件 .....     | 145 |
| 三、挤出成形及其工艺条件 .....     | 147 |
| 四、压制成形及其工艺条件 .....     | 148 |
| 五、其他成形方法简介 .....       | 149 |
| 第三节 塑料制品的工艺结构性 .....   | 151 |
| 一、塑料制品壁厚的设计 .....      | 151 |
| 二、塑料制品圆角的设计 .....      | 152 |
| 三、加强筋的设计 .....         | 152 |
| 四、塑料制品上金属嵌件的设计 .....   | 153 |
| 第四节 塑料的加工与表面处理技术 ..... | 153 |
| 一、塑料的加工 .....          | 153 |
| 二、塑料的表面处理 .....        | 154 |
| 复习思考题 .....            | 156 |

## 第七章 工业陶瓷及其成形技术

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 第一节 工业陶瓷材料 .....    | 157 |
| 一、陶瓷的概念 .....       | 157 |
| 二、陶瓷材料的性能 .....     | 157 |
| 三、常用工业陶瓷 .....      | 158 |
| 第二节 工业陶瓷的成形方法 ..... | 159 |
| 一、模压成形 .....        | 159 |
| 二、等静压成形 .....       | 159 |



|                     |     |
|---------------------|-----|
| 三、注浆法成形 .....       | 159 |
| 四、热压铸成形 .....       | 159 |
| 五、塑性成形 .....        | 160 |
| 六、带式成形方法 .....      | 160 |
| 第三节 陶瓷制品的生产过程 ..... | 160 |
| 一、原料的制备 .....       | 160 |
| 二、坯体干燥 .....        | 161 |
| 三、陶瓷的烧成或烧结 .....    | 161 |
| 四、陶瓷烧结后的处理 .....    | 163 |
| 复习思考题 .....         | 164 |
| 参考文献 .....          | 165 |

# 第一章 金属材料与热处理

金属材料是现代机械制造工业所需要的最主要材料之一。它不但具有制造机器所需要的物理、化学和力学性能,而且还具有较简单的成形方法和良好的成形工艺性能,因此,金属材料在机械设备中所占的比例约在 80% 以上。

金属材料的性能主要与其成分、组织和表面结构特性有关。热处理就是通过改变金属材料的组织或改变表面成分和组织来改变其性能的一种热加工工艺。

## 第一节 金属材料的主要性能

金属材料获得广泛的应用,不仅是由于它的来源丰富,而且还由于它具有优良的使用性能与工艺性能。使用性能包括力学性能和物理、化学性能。工艺性能则是指金属是否易于加工成形的性能。它们是进行设计、选材和制定工艺的依据。

### 一、力学性能

金属材料的力学性能是指金属在外力作用下所表现出来的特性。

#### 1. 强度

强度是指金属材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力。金属材料的强度和塑性指标是通过拉伸试验测定的。图 1-1 为低碳钢材料试样的拉伸曲线。

(1) 弹性极限  $\sigma_e$ 。弹性变形是指金属材料承受载荷时产生变形,卸载后又恢复原状的行为。弹性极限是指金属材料保持弹性变形时的最大应力。

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0} \quad (\text{MPa})$$

式中:  $P_e$ ——弹性极限载荷, N;

$F_0$ ——试样原始截面积,  $\text{mm}^2$ 。

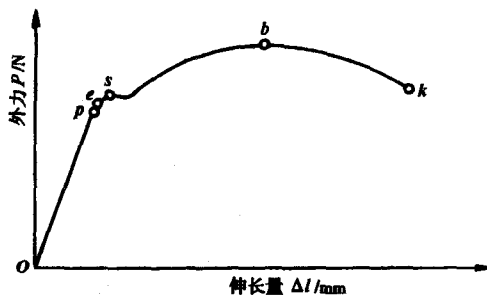


图 1-1 低碳钢的拉伸曲线图

(2) 屈服极限  $\sigma_s$ 。当载荷增加到  $P_s$  时,拉伸曲线上出现了平台,此时载荷虽然不增加,试样却继续产生塑性变形,这一现象称为屈服现象。屈服极限是指金属材料开始发生屈服现象时的应力。

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} \quad (\text{MPa})$$

式中:  $P_s$ ——产生屈服现象时的载荷, N。

工程上使用的金属材料,大多数没有明显的屈服现象,对此类材料,工程规定产生 0.2% 塑性变形时的应力作为屈服极限,用  $\sigma_{0.2}$  表示,称为条件屈服极限。

绝大多数机器零件在使用过程中不允许产生明显的塑性变形,所以,屈服极限  $\sigma_s$  ( $\sigma_{0.2}$ ) 是

设计机器零件和选择、评定金属材料性能的重要指标。

(3)强度极限  $\sigma_b$  强度极限是指金属材料在拉断前所能承受的最大应力。

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0} \quad (\text{MPa})$$

式中:  $P_b$ ——试样拉断前所承受的最大载荷, N。

脆性材料在拉伸试验时,  $\sigma_{0.2}$ 也很难测出。因此, 选用脆性材料制作机器零件时, 常以  $\sigma_b$  作为选材和设计的依据。

## 2. 塑性

塑性是指金属材料在外力作用下产生塑性变形而不破断的能力。常用的塑性指标有延伸率  $\delta$  和断面收缩率  $\psi$ 。

$$\delta = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\%$$

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \times 100\%$$

式中:  $L_0$ ——试样的原始长度, mm;

$L$ ——试样被拉断时的长度, mm;

$F_0$ ——试样的原始截面积,  $\text{mm}^2$ ;

$F_k$ ——试样断裂处的截面积,  $\text{mm}^2$ 。

$\delta$  和  $\psi$  的数值越大, 表示金属材料的塑性越好, 工程上一般把  $\delta > 5\%$  的材料称为塑性材料, 把  $\delta < 5\%$  的材料称为脆性材料。

金属材料的塑性对零件的成形加工和使用的安全性有着重要的意义。塑性好的金属材料能通过塑性变形顺利地实现成形加工。另外, 拉伸试验表明, 经过明显塑性变形之后的金属材料得到强化, 因此, 材料塑性好的机器零件万一超载时, 能避免突然断裂。

## 3. 硬度

硬度是指金属材料表面抵抗外物压入的能力, 或者说是在金属材料局部体积内抵抗变形, 特别是塑性变形的能力。硬度是一个反映金属材料弹性、塑性、韧性和强度等一系列物理特性的综合力学性能指标。常用的硬度指标有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度。

(1)布氏硬度 布氏硬度的测定是用一定的载荷  $P$ , 将直径  $D$  的钢球压入被测材料的表面, 以载荷压痕面积之比作为硬度值。用 HB 表示。

布氏硬度的优点是测量方法简单, 数值较准确, 但是压痕较大, 不适宜检查成品和太薄的零件。常用于调质钢、正火钢、退火钢和铸铁件, 硬度范围为 HB140~450。HB 值越大, 材料就越硬。

(2)洛氏硬度 最常用的洛氏硬度是 HRC。压头采用顶角  $120^\circ$  的金刚石圆锥, 载荷为 1500N, 根据压痕的深度, 可在硬度计上直接读出它的硬度值。这种硬度值标准适用于调质钢和淬火钢等较硬的材料, 硬度范围为 HRC20~67。

洛氏硬度法操作简便、效率高、压痕小, 常用于成品检验。缺点是因为压痕小读数重复性差, 故需多测几点, 取其平均值。

(3)维氏硬度 维氏硬度压头采用面夹角为  $136^\circ$  的金刚石四棱锥体。载荷根据不同要求从 50~200N 加以选择。从硬度计上的显微镜测出压痕对角线长度  $d$ , 查表即可得出维氏硬度值 HV。

维氏硬度的压痕很小,常用于测量比较薄的材料,也可用于测量经过电镀、渗碳、氮化等表面处理后的零件,缺点是操作较繁,试样必须有较好的表面质量,不适用于批量生产的常规检验。

硬度与强度之间有着一定的关系。因为硬度反映了金属材料在局部范围内抵抗变形的能力,所以它们存在着内在联系,往往材料的强度愈高,其硬度值也愈高。

硬度试验简便迅速,基本上不损伤零件,因此在生产中得到广泛的应用。

#### 4. 冲击韧性

许多机器零件和工具是在冲击载荷下工作的。冲击载荷引起的应力比静载荷大得多,因此设计制造受冲击载荷的零件时,必须考虑材料的冲击韧性。

冲击韧性是指金属材料抵抗冲击载荷的能力,通常用摆锤冲击试验来测定。采用冲击功  $A_k$  作为材料的冲击韧性指标,其单位为焦耳(J)。 $A_k$  值越小表明材料的韧性越低,脆性越大。

$A_k$  值对组织缺陷很敏感,它能灵敏地反映出材料的品质、宏观缺陷和显微组织方面的微小变形,因此在生产上常用来检验原材料缺陷及铸、锻件和热处理的工艺质量。

#### 5. 疲劳极限

有些机器零件如轴、齿轮、弹簧等,在工作中受到方向、大小反复变化的交变应力作用,在交变应力的长期作用下,当零件的工作应力远低于材料的强度极限甚至低于屈服极限时,经过多次的应力循环后,零件会突然断裂。无论是脆性材料还是塑性材料,疲劳断裂总是呈脆性断裂。因此,疲劳断裂具有很大的危险性,在生产中容易造成重大事故。

疲劳极限是指金属材料经受无数次重复交变应力作用而不断裂的最大应力。当其应力呈对称循环时,疲劳极限用  $\sigma_{-1}$  表示,材料的疲劳极限通常是在旋转对称弯曲疲劳试验机上测定的,降低零件的表面粗糙度,进行表面强化处理是提高疲劳极限的有效措施。

## 二、物理、化学及工艺性能

金属材料的使用性能以力学性能为主,但在某些条件下就必须考虑物理、化学性能。另外,利用金属材料制造机器零件时,首先需要对其进行各种加工,所以工艺性能也是金属材料的一项重要性能指标,因为它直接影响加工方法、生产率及成本等。

(1)物理性能 金属材料的物理性能主要有比重、熔点、热膨胀性、导热性、导电性和磁性等。由于机器零件的用途不同,对其物理性能的要求也有所不同。例如,飞机零件要选用比重小的铝合金来制造,电器零件要求材料具有良好的导电性和磁性。

(2)化学性能 金属材料的化学性能是指在室温或高温下抵抗各种化学作用的能力,如耐酸性、耐碱性、抗氧化性等。

在腐蚀介质中高温下工作的零件,比在空气中或室温下的腐蚀更为强烈。在设计这类零件时,要特别注意金属材料的化学性能,应当选用如不锈钢、耐热钢等化学稳定性良好的合金。

(3)工艺性能 金属材料的工艺性能是指它在加工、制造过程中表现出来的特性。主要有铸造性能、锻造性能、焊接性能、切削加工性能及热处理性能等。这些性能将在以后有关章节分别介绍。

## 第二节 金属的晶体结构与结晶

金属的性能与金属的微观结构有着密切的关系,要深入地认识金属材料,就必须分析金属

的微观结构及其形成过程。

## 一、金属的晶体结构

固态物质可分为晶体和非晶体两大类。物质内部的原子按一定规律在空间排列的称为晶体,如图 1-2a),反之则是非晶体。一般固态金属都是晶体。

### 1. 晶格与晶胞

为了便于分析晶体中的原子排列规律,常以通过各原子中心的一些假想连线把它们在三维空间的几何排列形式描绘出来,使之成为一个空间格架,如图 1-2b)。这种表示晶体中原子排列形式的空间格子叫做晶格。由于晶体中原子重复排列的规律性,可以从晶格中确定一个最基本的单元来表达其排列形式的几何特征,如图 1-2c)。组成晶体的这种最基本的几何单元叫做晶胞。

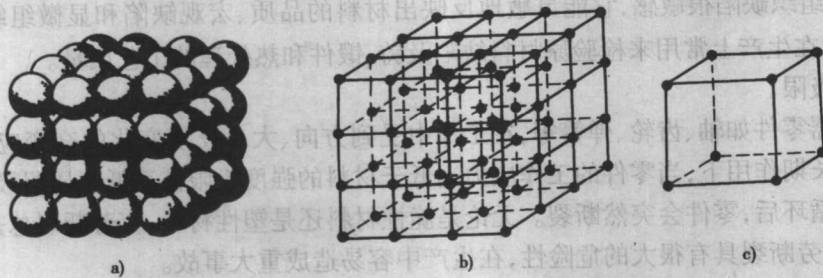


图 1-2 晶格与晶胞示意图

a)晶体中原子的排列;b)晶格;c)晶胞

### 2. 两种常见的晶格类型

大多数金属元素都具有比较简单的晶体结构,最常见的晶体结构有体心立方晶格和面心立方晶格两种。

(1)体心立方晶格 体心立方晶格的晶胞是一个立方体,金属原子排列在立方体的中心和八个顶角上,如图 1-3a)。具有这种晶格的金属有  $\alpha$ -Fe、Cr、Mo、V 等。

(2)面心立方晶格 面心立方晶格的晶胞也是一个立方体,金属原子排列在立方体的六个面的中心和八个顶角上,如图 1-3b)。具有这种晶格的金属有  $\gamma$ -Fe、Cu、Al、Ni、Au 等。

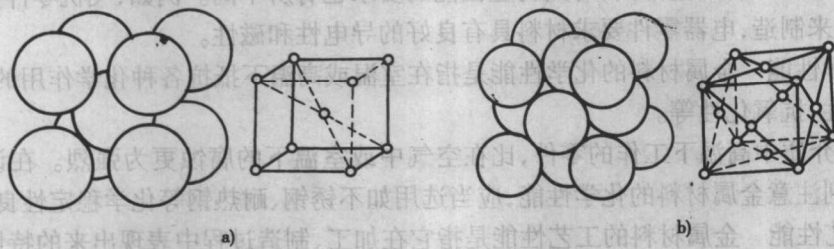


图 1-3 常见的晶格类型

a)体心立方晶格;b)面心立方晶格

## 二、纯金属的结晶

金属自液态转变为固态晶体的过程,也就是原子由不规则排列逐步过渡到规则排列的过程,称为结晶。

(1)冷却曲线与过冷现象 纯金属的结晶过程是在一个恒定的温度下进行的。使液态的纯金属缓慢地冷却下来,把冷却过程中的温度与时间的关系描绘在平面直角坐标系中,就得到了冷却曲线。如图 1-4 所示。冷却曲线上出现了一段平台,这是由于结晶过程中所放出的结晶潜热补偿了向环境中放出的热量所致。

在无限缓慢冷却条件下,测得的平台温度为  $T_0$ ,称为理论结晶温度。实际冷却条件下,测得的平台温度为  $T_1$ ,称为实际结晶温度。实际结晶温度总是低于理论结晶温度,这一现象称为过冷现象。理论结晶温度与实际结晶温度之差  $\Delta T$ ,叫做过冷度。冷却速度越快,金属的实际结晶温度就越低,过冷度就越大。

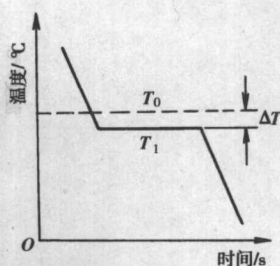


图 1-4 纯金属结晶时的冷却曲线示意图

(2)结晶过程 结晶过程是不断形成晶核和晶核不断长大的过程。液态金属在接近结晶温度时,存在着许多类似于晶体中原子有规则排列的小的原子集团,在理论结晶温度以上,由于温度的起伏和原子的热运动,这些小集团是不稳定的,时聚时散,此起彼伏。当低于理论结晶温度时,这些小集团中的一部分就成为稳定的结晶核心,称为晶核。随着时间的推移,已形成的晶核不断长大,同时液态金属中又会不断产生新的晶核并不断长大,直至液态金属全部消失,晶体彼此互相接触,结晶过程即告完成。所以,金属凝固后是由许多外形不规则的晶粒所组成的晶体,图 1-5 为结晶过程示意图。

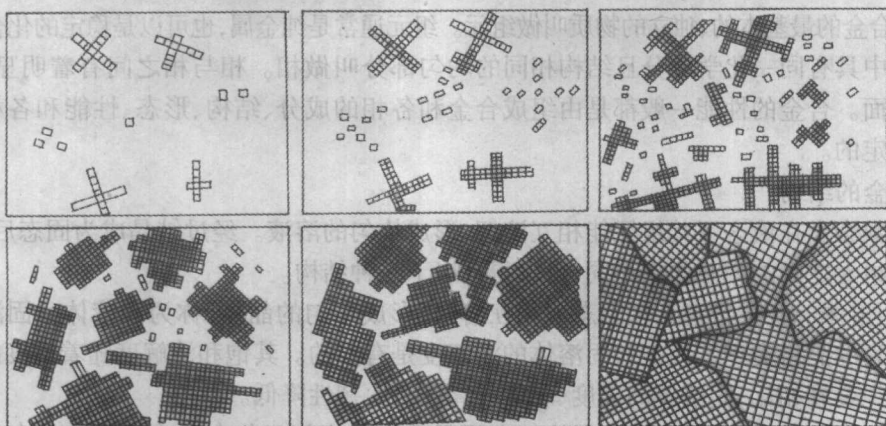


图 1-5 金属结晶过程示意图

### 三、金属的同素异构转变

某些金属在固态下因所处温度的不同而具有不同的晶格类型。金属在固态下随着温度改变由一种晶格转变为另一种晶格的现象称为同素异构转变。

图 1-6 是纯铁发生同素异构转变的冷却曲线。在  $1394 \sim 1538^\circ\text{C}$  的温度区间,纯铁是体心方晶格,称为  $\delta\text{-Fe}$ ;在  $912 \sim 1394^\circ\text{C}$  的温度区间是面心立方晶格,称为  $\gamma\text{-Fe}$ ;在  $912^\circ\text{C}$  以下为体心立方晶格,称为  $\alpha\text{-Fe}$ 。可见固态纯铁从高温到低温的冷却过程中,发生了两次同素异构转变。

金属的同素异构转变过程是与液态金属的结晶过程相似,同样遵守结晶的形核和晶核的生长。

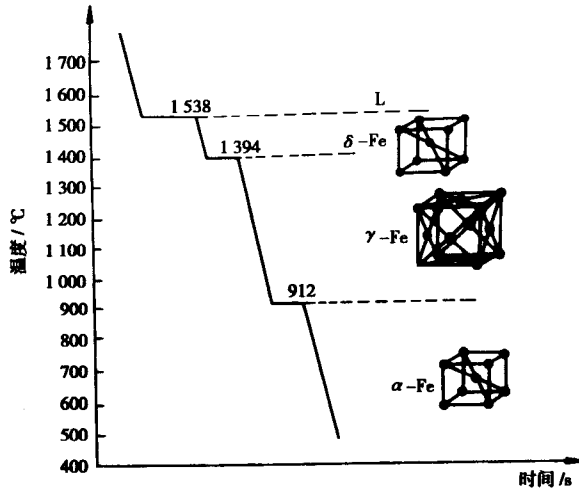


图 1-6 纯铁的同素异构转变

#### 四、合金的结构与二元合金相图的概念

由两种或两种以上的金属元素或金属元素和非金属元素组成的具有金属特性的物质称为合金。组成合金的最基本的、独立的物质叫做组元。组元通常是纯金属,也可以是稳定的化合物。

合金中具有同一化学成分且结构相同的均匀部分叫做相。相与相之间有着明显的界面,叫做相界面。合金的性能一般都是由组成合金和各相的成分、结构、形态、性能和各相的组合情况所决定的。

##### 1. 合金的结构

大多数合金在液态下其组元能相互溶解,形成均匀的溶液。经过结晶成为固态后,由于构成合金各组元之间的相互作用不同,可以得到以下三种结构。

(1) 固溶体 合金各组元在固态下相互溶解,形成均匀的晶体,称为固溶体。固溶体仍保持溶剂元素的晶格类型。大多数固溶体的溶解度是有限的。其饱和溶解度随着温度的升降而增减。与纯金属相比,固溶体的强度、硬度升高,塑性、韧性降低。

(2) 金属化合物 合金组元之间按一定原子数量之比相互化合生成的一种具有金属特性的新相,称为金属化合物。金属化合物的晶格类型与组成它的任一组元的晶格类型完全不同,一般都为复杂晶格结构。

金属化合物的力学性能特点是硬而脆,不能单独使用。它存在于合金中可使合金的强度、硬度、耐磨性提高,塑性、韧性有所降低。通过调整合金中金属化合物的数量、大小、形状和分布状态可使合金的力学性能得到改善,从而满足使用要求。

(3) 机械混合物 合金中由两种或两种以上的相混合在一起而组成的一种多相组织,称为机械混合物。它的各组成相仍然保持着各自的晶格类型和性能。

机械混合物的力学性能主要取决于组成它的各相的性能以及各相在其中的数量、大小、形状和分布状态。

##### 2. 二元合金相图的概念

合金的结晶过程要比纯金属复杂,可以用相图来清楚表示。二元合金相图是表示二元合金系结晶过程中二元的成分、温度和结晶组织之间变化规律的简明图样。



合金相图通常是用实验方法测定出的,一般用热分析法在极缓慢的冷却条件下,作出合金系中一系列不同成分合金的冷却曲线,并确定冷却曲线上的结晶转变温度(又叫做临界点),然后把这些临界点画在“温度-成分”坐标图上,最后把坐标图上的各相应点连接起来,就得到了该合金系的相图。

### 第三节 铁碳合金

钢铁是现代机械制造工业中应用最广泛的金属材料,普通碳钢和铸铁属于铁碳合金。合金钢和合金铸铁实际上是有意加入合金元素的铁碳合金,因此,铁和碳是钢铁材料的两个最基本的组元。为了熟悉钢铁材料,就必须研究铁碳合金的成分、组织和性能之间的关系。

#### 一、铁碳合金的基本组织

在铁碳合金中根据含碳量不同,碳可以溶解在铁中形成固溶体,也可以与铁形成化合物。在铁碳合金中有以下几种基本相和组织。

(1)铁素体 碳溶解在  $\alpha$ -Fe 形成的固溶体叫做铁素体,通常用 F 表示。它仍保持  $\alpha$ -Fe 的体心立方结构。

$\alpha$ -Fe 的溶碳能力很小,在 727℃ 溶解度最大达到 0.0218%。

铁素体含碳量很小,它的力学性能与纯铁相似,强度、硬度低,塑性、韧性高。

(2)奥氏体 碳溶解在  $\gamma$ -Fe 中形成的固溶体叫做奥氏体,通常用 A 表示。它保持  $\gamma$ -Fe 的面心立方结构。

(3)渗碳体 铁与碳形成的稳定化合物  $\text{Fe}_3\text{C}$  叫做渗碳体,它的含碳量为 6.69%,具有复杂的晶格形式。

渗碳体的硬度很高,而塑性极差,几乎为零,是一个硬而脆的相。渗碳体的碳钢中可起强化作用,钢中含碳量越高,渗碳体的数量越多,钢的硬度越高而塑性越低。

(4)珠光体 铁素体和渗碳体组成的机械混合物叫做珠光体,平均含碳量为 0.77%,通常用 P 表示。由于珠光体是由硬的渗碳体片分布在铁素体的基体上所组成的两相机械混合物,故其力学性能介于渗碳体和铁素体之间,强度较高,硬度适中,有一定的塑性。

(5)莱氏体 奥氏体和渗碳体组成的机械混合物叫做莱氏体,平均含碳量为 4.3%,通常用  $L_d$  表示。室温下莱氏体中的奥氏体要转变成珠光体和二次渗碳体,所以变成了珠光体和渗碳体的机械混合物,称为变态莱氏体,通常用  $L'_d$  表示。莱氏体的硬度很高,塑性极差。

#### 二、铁碳合金相图分析

铁碳合金相图是研究铁碳合金的基础。由于含碳量高于 6.69% 的铁碳合金,没有使用价值,因而铁碳合金只研究 Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  部分。图 1-7 是简化后的 Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  相图。为了分析合金的结晶过程方便起见,在相图上附加了六组典型合金的成分垂线(I~VI)。

##### 1. 相图分析

Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  相图中的主要特征点温度、成分及其说明如表 1-1 所示。

Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  相图中的特征线的含义为:

ACD 线为液相线。各种不同成分的铁碳合金冷却到此线温度时便开始结晶。

AECF 线为固相线。合金冷却到此线温度时全部结晶为固态。

GS 线是冷却时奥氏体析出铁素体的开始线。

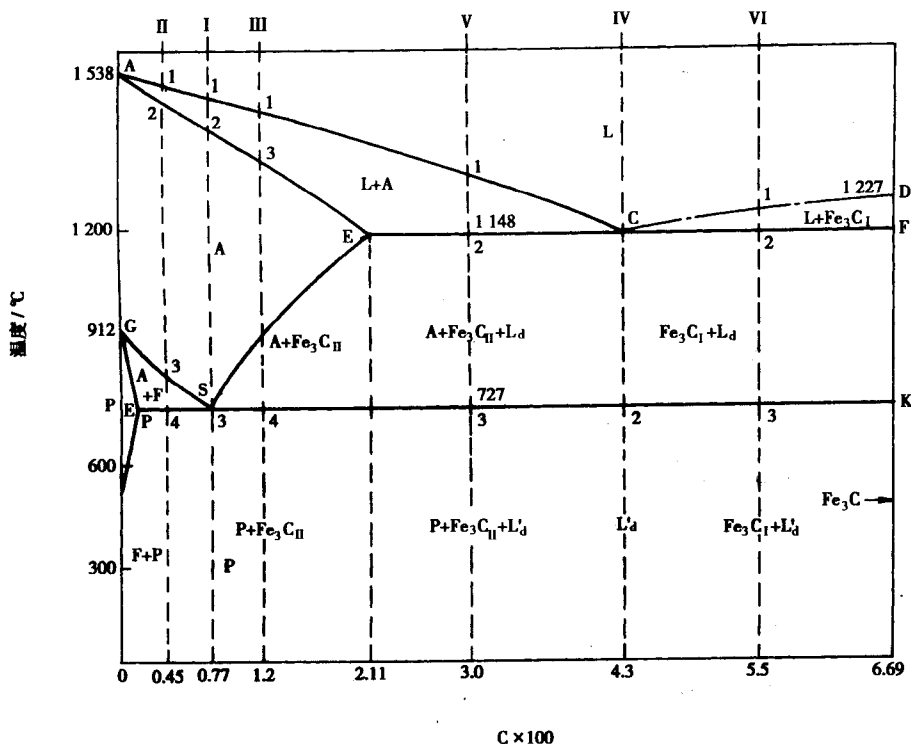


图 1-7 简化 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图

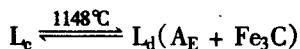
ES 线是碳在奥氏体中的溶解度曲线。在此线温度以下,奥氏体中开始析出二次渗碳体 (Fe<sub>3</sub>C<sub>II</sub>)

Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中的特征点

表 1-1

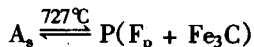
| 点的符号 | 温度/°C | 含碳量   | 说明   |
|------|-------|-------|--|
| A    | 1538  | 0     | 纯铁熔点                                       |
| C    | 1148  | 4.3%  | 共晶点 L <sub>2</sub> = A + Fe <sub>3</sub> C |
| D    | 1227  | 6.69% | 渗碳体熔点                                      |
| E    | 1148  | 2.11% | 碳在 γ-Fe 中最大溶解度                             |
| G    | 912   | 0     | α-Fe = γ-Fe, 纯铁的同素异构转变点                    |
| S    | 727   | 0.77% | 共析点 A <sub>1</sub> = F + Fe <sub>3</sub> C |

ECF 线称为共晶线。合金冷却到此线温度时便要发生共晶反应。



一定成分的液体的恒定的温度下,同时结晶出两种成分和结构皆不相同的固相,称为共晶反应。铁碳合金的共晶反应产物是莱氏体。

PSK 线称为共析线。合金冷却到此线温度时便要发生共析反应。



共析反应是从一种晶体中同时结晶出两种新的晶体反应。铁碳合金的共析反应产物是珠光体。Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中的主要特征线及其说明如表 1-2。