

总主编 曹茂盛 李大勇 荆天辅

总主审 蒋成禹 廖 波 刘永兵

(修订版)

# 材料科学与工程系列教材

根据 1998 年教育部颁布本科最新专业目录编写

主编 邱平善 王世刚 鞠 刚

主审 崔占全 高聿为 孙松林

# 工程材料辅助教材



哈尔滨工程大学出版社

材料科学与工程系列教材

总主编 曹茂盛 李大勇 荆天辅  
总主审 蒋成禹 廖 波 刘永兵

# 工程材料辅助教材

(修订版)

主 编 邱平善 王世刚 鞠 刚  
副主编 傅宇东 高玉芳  
主 审 崔占全 高聿为 孙松林

哈尔滨工程大学出版社

## 内 容 简 介

本书是《工程材料》的配套教材,全书共分四部分。第一部分 1~15 章与《工程材料》教材相对应,介绍了每章的内容提要和学习重点。第二部分为各章的习题。第三部分是课堂讨论。第四部分介绍了本课程的实验和常用附表。

本书可作为高等学校机械类和近机类各专业学生《工程材料》的辅助教材,也可供从事材料研究和应用工作的科技人员参考。

### 工程材料辅助教材 (修订版)

主编 邱平善 王世刚 鞠 刚

责任编辑 田宝荣

\*

哈尔滨工程大学出版社出版发行  
哈尔滨市南通大街145号 哈工程大学11号楼  
发行部电话(0451)2519328 邮编:150001  
新华书店经销  
肇东粮食印刷厂印刷

\*

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 8.5 字数 190 千字

2001 年 4 月修订版 2001 年 5 月第 1 次印刷

印数:1~5 000 册

ISBN 7-81073-043-6

TH·4 定价:8.80 元

## 序 言

材料科学与工程系列教材是材料科学与工程系列教材编审委员会组织国内部分高校专家学者共同编写的一套大型系列教学丛书,被列为国家新闻出版署“九五”重点图书出版计划。编写本套丛书的基本指导思想是:总结已有,通向未来,面向 21 世纪,以优化教材链为宗旨,依照为培养材料科学人才提供一个捷径的原则,确定培养目标、编写大纲、书目及主干内容。为了确保图书品位、体现国家水平,编审委员会全体成员对国内外同类教材进行了长期细致的调查研究,广泛征求各参编院校第一线任课教师的意见,认真分析国家教育部新的学科专业目录和全国材料工程类专业教学指导委员会第一届全体会议的基本精神,进而制定了具体的编写大纲。经过全体编审人员的共同努力,现在这套教材即将出版发行,我们热切期望这套大型系列教学丛书能够满足国内高等院校材料工程类专业教育发展的需要,并且在教学实践中得以不断充实、完善和发展。

在本书的编写过程中,注意突出了以下几方面特色:

1. 根据科学技术发展的最新动态和我国高等学校学科归并的现实需求,坚持了加强基础、拓宽专业面、更新教材内容的基本原则。
2. 注重优化课程体系,探索教材新结构,即兼顾材料工程类学科中的金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料共性与个性的结合,实现多学科知识的交叉与渗透。
3. 反映当代科学技术的新概念、新知识、新理论、新技术、新工艺,突出反映教材内容的现代化。
4. 坚持体现教材内容深广度适中,够用为原则,增强适用性。
5. 在系列教材编写过程中,进行了国内外同类教材对比研究,吸取了国内外同类教材的精华,重点反映新教材体系结构特色,把握教材的科学性、系统性和适用性。

此外,本套系列教材还兼顾了内容丰富、叙述深入浅出、简明扼要、重点突出等特色,能充分满足少学时教学的要求。

参加本套系列教学丛书编审工作的有哈尔滨工业大学、吉林工业大学、哈尔滨工程大学、燕山大学、哈尔滨建筑大学、哈尔滨理工大学、华东船舶工业学院和齐齐哈尔大学、长春装甲兵技术学院、青岛化工学院、郑州轻工业学院等 11 所院校百余名专家学者,他们为本套系列教材编审付出了大量的心血。在此,编审委员会对这些同志无私的奉献致以崇高的敬意。在本套系列教材编审的过程中,得到了全国材料工程类专业教学指导委员会主任吴林教授和哈尔滨工业大学材料科学与工程学院副院长方洪渊教授的指导,中国工程院雷廷权院士应邀出席了本套系列教材的终审讨论会,并就学科建设、课程建设及教材建设提出了许多宝贵意见。在此,一并表示衷心的感谢。

限于编审者的水平,疏漏和不妥之处在所难免,欢迎同行和读者指正。

材料与工程系列教材  
编审委员会  
2000 年 3 月

## 材料科学与工程系列教材编审委员会

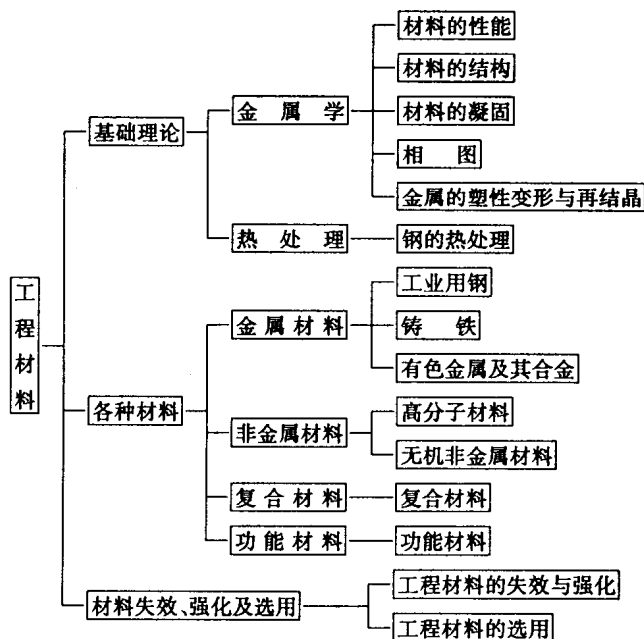
|       |           |     |     |     |
|-------|-----------|-----|-----|-----|
| 主任委员  | 曹茂盛       |     |     |     |
| 副主任委员 | 张宝生       | 张显友 | 荆天辅 |     |
| 委员    | (按姓氏笔画排序) |     |     |     |
|       | 邓启刚       | 王荣国 | 李大勇 | 李庆芬 |
|       | 孙德智       | 孙松林 | 刘永兵 | 陈平  |
|       | 杨尚林       | 张德庆 | 姜兆华 | 赵品  |
|       | 常铁军       | 崔占全 | 谢辅洲 | 蒋成禹 |
|       | 廖波        | 戴金辉 |     |     |

# 前 言

材料是制造物品的原材料,是人类生产活动和生活所必需的物质基础。材料利用情况是人类文明的标志。近几十年来,人们一直把材料、信息、能源称为现代技术的三大支柱。我国把材料科学提到战略的高度重点发展。“工程材料”是机械类和近机类各专业的技术基础课,它是研究材料的性能、化学成分、内部组织结构之间的关系及其变化规律的一门学科。作为机械工程的技术人员,只有了解并掌握这些关系及变化规律,才能做到正确地选用材料,正确地制定加工工艺,也才能生产出成本低、使用性能好、寿命长的机械零件或机械产品。

工程材料的种类繁多,分类方法各异。若按化学成分与结合键的特点,一般可将工程材料分为金属材料、非金属材料 and 复合材料三大类,如下表所示。

| 材料名称  |         | 化学成分         | 结合键       |
|-------|---------|--------------|-----------|
| 金属材料  | 黑色金属    | 金属 + 金属或非金属  | 金属键为主     |
|       | 有色金属    |              |           |
| 非金属材料 | 有机高分子材料 | C、H 化合物      | 共价键 + 化学键 |
|       | 无机非金属材料 | 金属 + 非金属化合物  | 离子键 + 共价键 |
| 复合材料  |         | 两种或两种以上材料的组合 | 混合键       |



《工程材料》全书共分十五章,按课程内容可归纳成基础理论、工程材料和机械零件的失

效、强化与选材三大部分。各部分内容及各章之间的关系用框架图示意的表达,如图所示。第四章二元相图,第六章钢的热处理,第七章工业用钢是本课程的重点章。为了适应新材料的发展和促进新材料的应用,本书增加了凝固理论的应用、功能材料与未来材料的发展动向,以及机械零件的失效、强化与选材的章节。这样不但为工程材料增加了新的成员,而且为挖掘材料潜力、降低机械零件的成本和延长使用寿命指明了方向。通过课程学习,达到以下要求:

1. 掌握有关工程材料的基础理论和基础知识;
2. 掌握常用热处理工艺及其应用;
3. 了解工程材料的分类、成分范围、热处理工艺、性能特点及应用情况;
4. 根据机械零件的服役条件和性能要求,培养学生对材料能够进行强化和强韧化的处理,并能正确合理地选用工程材料和制定出合理的加工工艺路线以及工艺规范。

为了学好本课程,我们在总结每章内容提要及重点的基础上还编写了大量习题,其中有名词解释、填空、简答题、判断及选择填空等,使学生能深入掌握课程的基本知识。

对于本课程的重点章节,即铁碳平衡图、钢的热处理、工业用钢及材料的选用进行课堂讨论,针对工程中的实际问题启发学生的积极性。通过课堂讨论,培养学生分析问题与解决实际问题的能力。

为了培养学生的实际操作能力,使学生进一步理解所学知识,本教材中还编写了实验课内容,通过实验,学生不仅能够掌握理论知识,还能学会亲自动手对材料进行处理和检测,并学会根据机械零件的工作条件和失效方式,对实际应用的机械零件进行正确的选材和进行合理的热处理,以达理论联系实际的目的。

本书可作为工科大专院校机械类和近机类专业本科生、大专生学习“工程材料”、“金属学及热处理”等课程的辅助教材或参考教材。

本书是在多年的教学实践的基础上,参考兄弟院校的有关教学资料而编写的。本书由邱平善、王世刚、鞠刚主编,傅宇东、高玉芳为副主编。此外,刘爱东、付瑞东、李莉同志参加了部分章节的编写工作。全书由崔占全、高聿为、孙松林主审。在编写过程中得到了总主编曹茂盛教授的亲自指导。参加本书编审工作的院校有吉林工业大学、哈尔滨工程大学、燕山大学、哈尔滨理工大学、华东船舶工业学院、齐齐哈尔大学、长春装甲兵技术学院等。

哈尔滨工程大学谢辅洲老师对教材的编写及审稿工作做出了巨大奉献,在此一并感谢!由于作者水平所限,难免有许多不当之处,敬请读者批评指正。

编 者  
2000年2月

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| <b>第一编 内容提要与学习重点</b> ..... | 1  |
| 第一章 材料的性能 .....            | 1  |
| 第二章 材料的结构 .....            | 4  |
| 第三章 材料的凝固 .....            | 6  |
| 第四章 二元相图 .....             | 9  |
| 第五章 金属的塑性变形与再结晶 .....      | 11 |
| 第六章 钢的热处理 .....            | 15 |
| 第七章 工业用钢 .....             | 20 |
| 第八章 铸铁 .....               | 26 |
| 第九章 有色金属及合金 .....          | 28 |
| 第十章 高分子材料 .....            | 30 |
| 第十一章 陶瓷材料 .....            | 31 |
| 第十二章 复合材料 .....            | 32 |
| 第十三章 功能材料 .....            | 33 |
| 第十四章 零件的失效与强化 .....        | 36 |
| 第十五章 零件的选材 .....           | 41 |
| <b>第二篇 习 题</b> .....       | 42 |
| 第一章 材料的性能 .....            | 42 |
| 第二章 材料的结构 .....            | 44 |
| 第三章 材料的凝固 .....            | 47 |
| 第四章 二元相图 .....             | 49 |
| 第五章 金属的塑性变形与再结晶 .....      | 55 |
| 第六章 钢的热处理 .....            | 57 |
| 第七章 工业用钢 .....             | 60 |
| 第八章 铸铁 .....               | 64 |
| 第九章 有色金属及合金 .....          | 66 |
| 第十章 高分子材料 .....            | 68 |
| 第十一章 陶瓷材料 .....            | 70 |
| 第十二章 复合材料 .....            | 71 |
| 第十三章 功能材料 .....            | 72 |
| 第十四章 零件的失效与强化 .....        | 73 |
| 第十五章 零件的选材 .....           | 75 |
| <b>第三编 课堂讨论</b> .....      | 77 |
| 课堂讨论一 铁碳合金相图 .....         | 77 |



|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 课堂讨论二 钢的热处理 .....          | 80  |
| 课堂讨论三 工业用钢 .....           | 81  |
| 课堂讨论四 材料的选择和使用 .....       | 82  |
| <b>第四编 实 验</b> .....       | 86  |
| 实验一 金相显微镜的使用及金相试样的制备 ..... | 86  |
| 实验二 铁碳合金平衡组织的显微观察与分析 ..... | 92  |
| 实验三 硬度试验 .....             | 96  |
| 实验四 钢的热处理.....             | 101 |
| 实验五 碳钢热处理后的显微组织观察与分析.....  | 104 |
| 实验六 合金钢、铸铁、有色金属显微组织观察..... | 109 |
| 附表.....                    | 115 |

# 第一编 内容提要及学习重点

## 第一章 材料的性能

### 1.1 内容提要

材料的性能是指材料的使用性能和工艺性能。材料的使用性能包括力学性能、物理性能和化学性能,材料的工艺性能包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理性能和切削加工性能等。

#### 1. 材料的力学性能

材料的力学性能是指材料抵抗外力作用时表现出来的性能。力学性能包括弹性与刚度、强度、塑性、硬度、韧性、疲劳等,见表 1-1。材料的力学性能是机械设备的设计和制造零件选材的主要依据之一。

表 1-1 力学性能总结表

| 性能名称 | 符号意义                                        | 单位          | 获得方法或含义                                                                                                                   | 应用                                                                                      |
|------|---------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 弹性模量 | 正弹性模量 $E$                                   | Pa<br>(MPa) | 在应力与应变的关系符合虎克定律时,应力与应变的比值:<br>$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ $G = \frac{\tau}{\gamma}$                                     | 用于刚度计算                                                                                  |
|      | 切弹性模量 $G$                                   |             |                                                                                                                           |                                                                                         |
| 刚度   | $EF$ (拉压)<br>$EJ$ (弯曲)<br>$GJ$ (扭转)         |             | 材料抵抗弹性变形的能力。在比例极限以内计量                                                                                                     | 工程技术上,根据情况常以挠度( $f$ )或扭转角( $\theta$ )来核算刚度,以免因零件过量弹性变形而失去精度或效用                          |
| 强度   | 弹性极限 $\sigma_e$                             | Pa<br>(MPa) | 试样能保持纯弹性变形的最大应力                                                                                                           | 弹性零件要求材料有高的弹性极限,一般零件不要求                                                                 |
|      | 屈服极限 $\sigma_s$ ( $\sigma_{0.2}$ )          |             | 试样出现应力不再增加而变形仍在进行的现象时的应力, $\sigma_s = \frac{P_s}{F_0}$ , 使试样产生塑料变形为 0.2% 时的应力为条件屈服极限 $\sigma_{0.2} = \frac{P_{0.2}}{F_0}$ | 工、模具和机械零件所受应力均应小于屈服极限,否则将因塑性变形而失效,所以是强度计算的重要依据                                          |
|      | 抗拉强度极限 $\sigma_b$                           |             | 能使试样保持最大均匀变形的极限应力 $\sigma_b = \frac{P_b}{F_0}$                                                                            | 是强度计算的重要依据。零件所受应力超过 $\sigma_b$ , 将产生断裂                                                  |
| 疲劳   | 疲劳强度 $\sigma_{-1}$ (弯曲)<br>$\tau_{-1}$ (剪切) | Pa<br>(MPa) | 试样在交变应力作用下,经无限次循环而不断裂的最大应力                                                                                                | 从理论上讲,零件所受应力低于疲劳强度时,其疲劳寿命是无限的;反之,则是有限的。在工程上,规定钢铁材料经 $10^7$ 次,有色金属经 $10^8$ 次以上,即可视为无限次循环 |

续表

| 性能名称 | 符号意义         | 单位                | 获得方法或含义                                                                       | 应用                                                                                 |
|------|--------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 塑性   | 延伸率 $\delta$ | %                 | 试样被拉断后全标距长的伸长量与原标距长比值的百分率                                                     | $\delta$ 与 $\psi$ 的数值越大, 材料的塑性就越好;<br>一般零件, 均需具有一定的塑性储备, 以提高安全性; 对于冲压件等, 则要求有较高的塑性 |
|      | 断面收缩率 $\psi$ |                   | 试样被拉断后, 缩颈处横截面积的收缩量与原横截面积比值的百分率<br>$\psi = \frac{\Delta F}{F_0} \times 100\%$ |                                                                                    |
| 韧性   | 一次冲击韧性 $a_k$ | J/cm <sup>2</sup> | 冲断试样后, 单位横截面积上所消耗的冲击功:<br>$a_k = \frac{A_K}{F}$                               | $a_k$ 值越大, 冲击韧性越好。用 $a_k$ 值测量材料的冷脆性转化温度 ( $T_K$ )。 $a_k$ 不做为设计计算数据                 |
|      | 多冲抗力         | 以抗冲次数或抗冲能量表示      | 试样由原始至断裂全过程所消耗的冲击功                                                            | 反映材料抵抗小能量多次冲击的能力。耐冲次数越多, 韧性越好                                                      |
| 硬度   | 布氏硬度 HB      | (不注单位)            | 在一定压力下将直径为 $D$ 的钢球压入被测金属表面, 测出压坑直径后, 查表得硬度值                                   | 测量硬度为 HB8~450 范围的钢铁、有色金属及其合金材料                                                     |
|      | 洛氏硬度         | HRC               | 无                                                                             | 测 HRC20~67 的淬火钢件及某些表面硬化件等                                                          |
|      |              | HRA               | 无                                                                             | 测 HRA70 以上的薄层表面硬化件及薄件、硬质合金等                                                        |
|      |              | HRB               | 无                                                                             | 测 HRB25~100 的铜、铝合金及软钢等                                                             |
|      | 维氏硬度 HV      | 不注单位              | 在规定压力下, 将 136° 的金刚石正四棱锥压入被测金属表面, 测出压痕对角线平均长度后, 查表得硬度值                         | 主要用于测极薄件及薄层表面硬化件等                                                                  |

## 2. 材料的物理和化学性能

材料的物理性能是指材料的固有属性, 它包括材料的密度、熔点、导热性、导电性、热膨胀性和磁性等。表 1-2 给出了部分常用金属的物理性能。

材料的化学性能是材料在化学介质的作用下所表现出的性能, 如材料的耐腐蚀性、抗氧化性和化学稳定性。

材料的物理性能和化学性能也是机械设备制造时选材和制定零件加工工艺的主要依据之一。

## 3. 材料的工艺性能

材料的铸造性能是指铸造成型获得优良铸件的能力, 其衡量指标有熔融状态下的流动性、铸件凝固和冷却过程中的体积和尺寸的收缩性以及材料凝固后, 内部化学成分和组织的不均匀性(偏析)。

表 1-2 常用金属的物理性能

| 金属名称 | 符 号 | 密度 $\rho(20^{\circ}\text{C})$<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | 熔 点<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 热导率 $\lambda$<br>( $\text{W/m}\cdot\text{k}$ ) | 线胀系数<br>$\alpha_t(0\sim 100^{\circ}\text{C})$<br>( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) | 电阻率 $\rho(0^{\circ}\text{C})$<br>$10^{-6}\Omega\cdot\text{m}$ |
|------|-----|------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 银    | Ag  | $10.49 \times 10^3$                                  | 960.8                         | 418.6                                          | 19.7                                                                            | 1.5                                                           |
| 铜    | Cu  | $8.96 \times 10^3$                                   | 1083                          | 393.5                                          | 17                                                                              | 1.67~1.68(20 $^{\circ}\text{C}$ )                             |
| 铝    | Al  | $2.7 \times 10^3$                                    | 660                           | 221.9                                          | 23.6                                                                            | 2.655                                                         |
| 镁    | Mg  | $1.74 \times 10^3$                                   | 650                           | 153.7                                          | 24.3                                                                            | 4.47                                                          |
| 钨    | W   | $19.3 \times 10^3$                                   | 3380                          | 166.2                                          | 4.6(20 $^{\circ}\text{C}$ )                                                     | 5.1                                                           |
| 镍    | Ni  | $4.5 \times 10^3$                                    | 1453                          | 92.1                                           | 13.4                                                                            | 6.84                                                          |
| 铁    | Fe  | $7.87 \times 10^3$                                   | 1538                          | 75.4                                           | 11.76                                                                           | 9.7                                                           |
| 锡    | Sn  | $7.3 \times 10^3$                                    | 231.9                         | 62.8                                           | 2.3                                                                             | 11.5                                                          |
| 铬    | Cr  | $7.19 \times 10^3$                                   | 1903                          | 67                                             | 6.2                                                                             | 12.9                                                          |
| 钛    | Ti  | $4.508 \times 10^3$                                  | 1677                          | 15.1                                           | 8.2                                                                             | 42.1~47.8                                                     |
| 锰    | Mn  | $7.43 \times 10^3$                                   | 1244                          | 4.98(-192 $^{\circ}\text{C}$ )                 | 37                                                                              | 185(20 $^{\circ}\text{C}$ )                                   |

材料的锻造性能是指材料是否易于进行压力加工的性能。它的好坏取决于材料的塑性和变形抗力。

材料的焊接性指材料焊接加工的适应性。对碳钢和低合金钢,焊接性主要同材料的化学成分有关(其中碳的影响最大)。

热处理是指材料通过加热、保温和冷却,使材料能够改变性能以满足加工和使用要求的热处理方法,常用的热处理方法有退火、正火、淬火、回火和表面热处理等。

切削加工性能是表征材料接受切削加工的难易程度,它以切削速度、加工表面的光洁度和刀具使用寿命等几方面来衡量。

上述五种工艺性能直接影响机械零件加工后的产品质量和零件的制造成本。材料的工艺性能也是制造机械零件时选材和制定零件加工工艺路线时必须考虑的因素。

应当指出的是,对于一般的机械工程材料应重点了解其力学性能,其次是工艺性能。而对于功能材料或具有其他特性的机械工程材料首先应重点了解其特殊的功能,其次再了解其力学性能和工艺性能等,以便于正确、合理的选用材料,从而满足设备的设计要求。

## 1.2 学习重点

1. 对表征材料的力学性能指标,包括  $\sigma_b$ 、 $\sigma_s$ 、 $\sigma_{0.2}$ 、 $\sigma_{-1}$ 、 $\delta$ 、 $\varphi$ 、 $a_k$ 、 $A_k$ 、HBS、HBW、HRC、HRB、HRA、HV、E,要认识并能解释其物理意义。其中重点是  $\sigma_b$ 、 $\sigma_s$ 、 $\sigma_{0.2}$ 、 $\sigma_{-1}$ 、 $\delta$ 、 $a_k$ 、 $A_k$ 、HBS、HRC。

2. 掌握布氏硬度和洛氏硬度的优缺点、相互关系和应用场合。

3. 掌握疲劳强度的概念和提高机械零件疲劳强度的途径。

## 第二章 材料的结构

### 2.1 内容提要

#### 1. 材料的结合方式

##### (1) 化学键

组成物质整体的质点(原子、分子和离子)间的相互作用力叫化学键。

化学键主要有共价键、离子键、金属键、分子键(范德瓦尔键)。

##### (2) 工程材料键性

金属材料:金属键、共价键。

陶瓷材料:离子键、共价键。

高分子材料:共价键、分子键。

#### 2. 晶体结构

##### (1) 晶体与非晶体

晶体由于其内部原子(或离子)在三维空间的规则排列,使其具有确定的熔点并具有各向异性。而非晶体中的原子是散乱排列的不具备上述特点。

##### (2) 三种典型金属晶体结构

金属材料的结合键主要是金属键。金属材料基本都是晶体,绝大多数金属是体心立方、面心立方和密排六方这三种典型结构构成。这三种结构见表 1-3 所示。

表 1-3 三种典型金属晶体结构

|      | 晶胞原子数 | 原子半径          | 致密度  | 密排面   | 密排方向                  |
|------|-------|---------------|------|-------|-----------------------|
| 体心立方 | 2     | $\sqrt{3}a/4$ | 0.68 | {110} | $\langle 111 \rangle$ |
| 面心立方 | 4     | $\sqrt{2}a/4$ | 0.74 | {111} | $\langle 110 \rangle$ |
| 密排六方 | 6     | $a/2$         | 0.74 | 底 面   | 底对角线                  |

##### (3) 晶面指数和晶向指数的确定

##### (4) 实际金属的缺陷与性能

实际金属不是单晶体而是多晶体。在实际金属中存在着各种晶体缺陷,包括点缺陷、线缺陷、面缺陷。它们的共同特点是破坏了晶格的完整性,造成晶格畸变,并直接影响晶体的性能。工程上实际应用的金属,其强化方法就是靠增加晶体缺陷实现的,如固溶强化、细晶强化、弥散强化和加工硬化等等。当然,强化金属材料的另一个途径是生产理想金属,这在工业生产和应用上目前是很困难的。

①点缺陷:主要有空位、间隙原子和置换原子。

②线缺陷:主要形式是两类位错(刃型位错、螺型位错)。

③面缺陷:主要形式是晶界和亚晶界、层错等。

#### 3. 合金相结构

##### (1) 固溶体

凡溶质原子完全溶于固态溶剂中,并能保持溶剂元素的晶格类型所形成的合金称为固溶体。

间隙固溶体:溶质原子在溶剂的间隙位置。

置换固溶体:溶质原子在溶剂中处于节点位置。

置换固溶体中,若溶质和溶剂原子可无限互溶,则称之为无限固溶体;若溶质和溶剂原子有限互溶,则称之为有限固溶体。

(2)金属间化合物

①正常价化合物

②电子化合物

③间隙相

④间隙化合物

4. 陶瓷和聚合物的结构特点

(1)陶瓷

陶瓷的结构有晶体、非晶体和气孔。陶瓷材料中如氧化物、碳化物、氮化物、硅化物、硼化物、氟化物等都具有比较简单的晶体结构。

①AB 型(NaCl 型)结构:MgO、CaO、MnO 等。

②AB<sub>2</sub> 型(金红石型)结构:Ti<sub>2</sub>O 等。

③A<sub>2</sub>B<sub>3</sub> 型(刚玉型)结构: $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等。

④其他:以 CaTiO<sub>3</sub> 钙钛矿结构化合物为代表的 ABO<sub>3</sub> 型结构,以及以 MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 尖晶石结构化合物为代表的 AB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 型结构。

(2)聚合物

聚合物主要以碳为主,同 H、O、N、Cl、S、Si 等原子以共价键结合,形成巨大的链形分子,分子之间以分子键结合形成的固态物质。分子之间的结合一般是无序的,也可一部分形成有序结构。

## 2.2 学习重点

应重点掌握晶体结构的基本概念、金属的三种典型晶体结构、实际金属中的三类晶体缺陷、合金的相结构。

## 第三章 材料的凝固

### 3.1 内容提要

#### 1. 材料的凝固过程

材料由液态变成固态有两种形式。一种是以金属及其化合物、陶瓷等材料为代表,具有固定的熔点和凝固点,凝固后的固体是晶体,这种凝固过程叫结晶。另一种材料以玻璃、聚合物为代表,这类液体在冷却过程中逐渐变硬,固化后的物质是非晶体。不同物质所发生的凝固过程是随条件而变化的。从理论上讲,任何物质都有可能出现两类凝固过程。

液态金属的结构不同于气体,而是短程有序的。金属的结晶过程是原子之间由短程有序过渡为长程有序的过程。金属材料实际结晶温度总是低于该金属的熔点。这样,理论结晶温度(凝固点)与实际结晶温度之差叫过冷度。过冷度就是结晶过程的驱动力。

结晶过程是由形核与晶核长大两个基本过程组成,如图 1-1 所示。

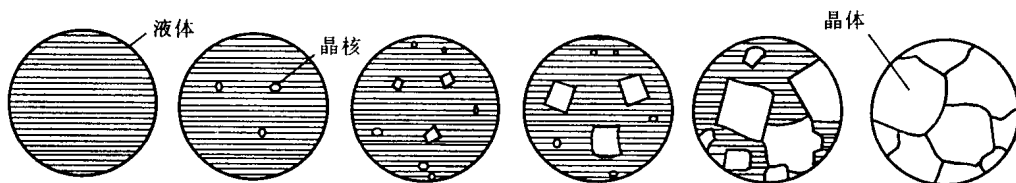


图 1-1 结晶过程示意图

晶核的生成有自发形核和非自发形核两种方式。自发生核的速率与过冷度的大小有关,过冷度越大,生核率  $N$  越大,见图 1-2。非自发形核是按“结构相似、大小相当”的原则,利用金属液中未溶的固体微粒或加入变质剂而形核的,所以非自发形核较自发形核容易。实际铸造生产中的结晶,非自发形核占大多数。

晶体的长大方式决定于散热条件。如果铸模壁温度较低,晶体长大时,通过固相模壁散热,固液界面是等温的,晶体是按平面推进的方式长大的。如果当模内金属液均被迅速过冷,靠近模壁的液体首先形核发生结晶并释放结晶潜热,此时

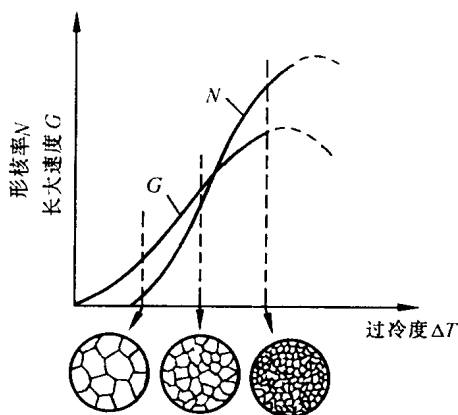


图 1-2 过冷度对形核率与长大速率的影响

固液界面温度最高,潜热在各个方向均匀散出,晶体是按树枝晶的方式长大,见图 1-3 所示。实际金属多为树枝晶结构。在结晶过程中,如果液体供应不充分,金属最后凝固的树枝晶之间的间隙不会被填满,往往有缩孔和疏松等缺陷存在。

#### 2. 晶粒大小的控制

金属的晶粒大小对其性能影响很大。常温下金属的晶粒越细小,其强度、硬度、塑性和韧性越好。为了得到细晶组织,可采用增大过冷度、变质处理和增加振动和搅拌等办法。在目前所能达到的过冷度情况下,过冷度增大,形核率( $N$ )与晶核的长大速度( $G$ )的比值增加

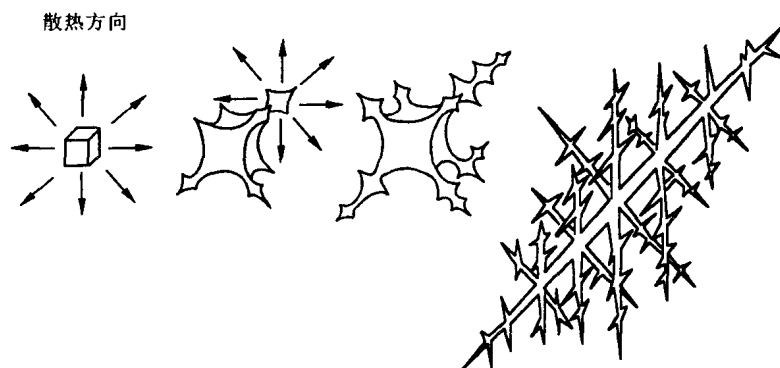


图 1-3 树枝晶长大示意图

(见图 1-2), 晶粒细小。变质处理又叫孕育处理, 就是在液态金属中加入能成为非自发形核的物质, 促进形核, 达到细化晶粒的目的。振动和搅拌为液体生核提供能量, 促进形核, 另一方面能打碎正在生长的树枝晶, 碎晶块又可成为新的晶核, 从而使晶粒细化。

### 3. 同素异构转变

有些物质在固态时会发生晶格类型的转变, 称为同素异构转变。同素异构转变要发生原子的重新排列, 所以它也是一种结晶过程。为了把这种固态下进行的转变与液态结晶相区别, 故称为二次结晶或重结晶。

同素异构转变也包括形核与长大过程, 也有一定的转变温度, 并有潜热产生。由于同素异构转变是在固态下发生的, 原子的扩散要比在液态下困难得多, 致使同素异构转变具有较大的过冷度。另外, 由于晶格不同, 其原子排列密度不同, 因而同素异构转变会使物质的体积发生变化, 并产生较大的内应力。同时因为同素异构转变时, 新晶格的晶核最容易在晶界处形成, 如图 1-4 所示。显然旧晶粒越细小, 新晶格的晶粒也越细小。控制冷却速度也可改变同素异构转变后的晶粒大小。

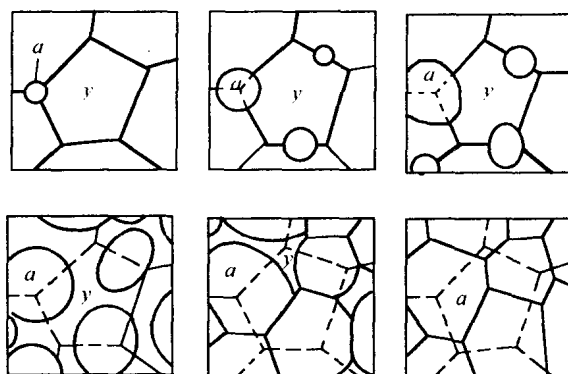


图 1-4  $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \alpha\text{-Fe}$  同素异构转变过程示意图

### 4. 凝固理论的应用

熔融态的物质固化时, 可以获得晶体、微晶、非晶体或者它们的混合物。影响非晶体凝固形成的主要因素有两个, 即熔体的粘度和冷却速度。高粘度的熔体, 凝固时容易形成非晶体。冷却速度越快, 晶核来不及形成, 就会得到非晶体。例如聚合物凝固后获得非晶态或晶态的原因与聚合物的结构类型和熔体的冷却速度有关。对于线型大分子链和具有交联的体型高分子的聚合物由于粘度大凝固后多为非晶态。线型、支化型和交联少的网状高分子聚合物固化时可以结晶。增大冷却速度或采取急冷技术可使绝大多数物质固化为非晶态。

快速凝固技术的出现和应用, 为新材料的研究创造了条件, 相继出现了非晶态合金、微



晶合金、准晶合金和纳米晶体等。它们的组织结构与常规的晶态物质相比有很大的差别。如非晶态合金是液体连续整体凝固所得。由于无相界、晶界,无位错与成分偏析,因此具有很高的室温强度、硬度和刚度,并且有高的抗腐蚀性、高电阻率、高磁导率、低磁损和低的声波衰减率等。微晶合金、准晶合金和纳米晶材料都有其奇特的功能,日益受到人们的重视并进行大力开发,从而进一步拓宽了材料的应用领域。

### 3.2 学习重点

1. 了解物质结晶的驱动力是过冷度。
2. 结晶过程是由形核和核长大组成。形核是由自发形核和非自发形核组成,其中非自发形核占大多数。核长大由平面推进式和树枝晶状两种方式,实际物质晶核的长大多数呈树枝状长大。
3. 晶粒大小对材料性能的影响及细化晶粒的方法。
4. 铁的同素异构转变:  $\alpha - \text{Fe} \xrightleftharpoons{912^{\circ}\text{C}} \gamma - \text{Fe} \xrightleftharpoons{1394^{\circ}\text{C}} \delta - \text{Fe}$ 。
5. 影响非晶态凝固的主要因素是熔体的粘度和熔体的冷却速度。