

普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套用书
高等学校理工科材料类规划教材

机械工程材料

辅导·习题·实验

于永泗 齐 民 徐善国/编著

(第五版)



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套用书
高等学校理工科材料类规划教材

机械工程材料

辅导·习题·实验

于永泗 齐 民 徐善国/编著

(第五版)



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料：辅导·习题·实验 / 于永泗，齐民，徐善国编著. — 5 版. — 大连：大连理工大学出版社，2013.6

ISBN 978-7-5611-7977-2

I. ①机… II. ①于… ②齐… ③徐… III. ①机械制造材料—高等学校—教学参考资料 IV. ①TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 133228 号

大连理工大学出版社出版

地址：大连市软件园路 80 号 邮政编码：116023

发行：0411-84708842 邮购：0411-84703636 传真：0411-84701466

E-mail: dutp@dutp.cn URL: <http://www.dutp.cn>

大连美跃彩色印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸：185mm×260mm 印张：5.5 字数：134 千字

1994 年 12 月第 1 版 2013 年 6 月第 5 版

2013 年 6 月第 16 次印刷

责任编辑：刘新彦 于建辉

责任校对：哲 石

封面设计：宋 蕾

ISBN 978-7-5611-7977-2

定 价：12.00 元

前 言

“机械工程材料”是高等学校机械类和近机类各专业的一门技术基础课。本书是由于永泗、齐民主编，大连理工大学出版社出版的《机械工程材料》一书的配套教材。

全书共四部分，第一部分阐述了《机械工程材料》一书各章的基本内容提要和学习重点，对学习重点和难点进行了举例和解析，有助于学生打开思路；第二部分按各章的内容和重点列出多种类型的习题，习题难度适中，并在书末给出了部分习题的参考答案，有助于学生对基本内容和学习重点的领会和掌握；第三部分为课堂讨论，通过对重点章节的课堂讨论，进一步加深对本书重点、难点的理解，有助于学生对全书内容的掌握；第四部分为课程实验指导，便于学生进行课前预习，加深对实验内容的理解及正确进行实验操作。书末附有平面布氏硬度值计算表和硬度值换算表。

本书与《机械工程材料》教材紧密配合，随教材内容的更新、结构的调整而及时进行修订，以促进课程教学。

本书可作为工科院校机械类和近机类各专业本专科学生学习“机械工程材料”、“材料科学基础”、“金属材料学”等课程的辅助教材或参考教材，也可与《机械工程材料》教材一起作为机械工程技术人员的参考书。

本书由于永泗、齐民、徐善国编写，于永泗统稿审定。对书中不足及错误之处，敬请读者批评指正。

您有任何意见或建议，请通过以下方式与大连理工大学出版社联系：

电话 0411-84707962 84708947

邮箱 jcjf@dutp.cn

编著者

2013年6月

目 录

第一部分 内容提要与学习重点	1
绪 论.....	1
第 1 章 材料的性能.....	2
第 2 章 材料的结构.....	4
第 3 章 材料的凝固.....	6
第 4 章 金属的塑性变形与再结晶	10
第 5 章 钢的热处理	11
第 6 章 工业用钢	15
第 7 章 铸 铁	18
第 8 章 有色金属及其合金	19
第 9 章 高分子材料	20
第 10 章 陶瓷材料.....	21
第 11 章 复合材料.....	22
第 12 章 新型材料.....	23
第 13 章 零部件的失效与选材.....	24
第二部分 习 题	26
第 1 章 材料的性能	26
第 2 章 材料的结构	27
第 3 章 材料的凝固	29
第 4 章 金属的塑性变形与再结晶	33
第 5 章 钢的热处理	35
第 6 章 工业用钢	38
第 7 章 铸 铁	40
第 8 章 有色金属及其合金	41
第 9 章 高分子材料	42
第 10 章 陶瓷材料.....	43
第 11 章 复合材料.....	44
第 12 章 新型材料.....	44
第 13 章 零部件的失效与选材.....	45

第三部分 课堂讨论	47
课堂讨论一 铁碳合金相图	47
课堂讨论二 钢的热处理	49
第四部分 实验	51
实验一 金相试样的制备和硬度计的使用	51
实验二 铁碳合金平衡组织的观察与分析	61
实验三 钢的热处理组织的观察与分析	66
实验四 钢的热处理	69
实验五 合金钢及铸铁组织的观察与分析	72
附录	75
附表1 平面布氏硬度值计算表	75
附表2 硬度值换算表	77
习题参考答案	78

第一部分 内容提要与学习重点

绪 论

一、内容提要

绪论部分简要介绍了材料在人类社会中的作用及其发展简史、材料科学的研究对象及研究内容、工程材料的分类及应用、学习机械工程材料课程的目的、性质和要求。

材料是用来制作有用器件的物质,是现代文明的三大支柱之一。“机械工程材料”是机械类和近机类各专业的重要技术基础课,主要研究材料的化学成分、组织结构、加工工艺与性能之间的关系(见图 1-1) 及其变化规律。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,才能做到合理选用材料、正确确定加工方法、妥善安排加工工艺路线,进而生产出成本低、使用性能好、寿命长的机械零件或机械产品。



图 1-1 材料化学成分、组织结构、加工工艺与性能之间的关系

机械工程材料的种类繁多,有多种分类方法,最常用的是按材料的组成与结合键特点进行分类,将材料分为金属材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料 4 大类,见表 1-1。

表 1-1 材料的组成、结合键及性能特点

材料类别	材料组成	结合键	主要性能
金属材料	以金属元素为主	以金属键为主	导电、导热、延展性好,具有金属光泽
陶瓷材料	以金属元素与非金属元素的化合物为主	以共价键+离子键为主	熔点、硬度、化学稳定性高,绝缘、耐热性能好,脆性大
高分子材料	以碳氢化合物为主	以共价键+分子键为主	耐蚀、绝缘、减振性能好,密度小
复合材料	两种或两种以上上述材料的组合	混合键	比强度、比模量高,抗疲劳、减振性能好,耐高温

通过课程学习,达到以下要求:

- (1) 掌握有关工程材料的基本理论和基本知识;
- (2) 了解常用材料的应用范围和加工工艺;
- (3) 初步具备合理选用材料的能力;
- (4) 初步具备确定材料加工方法及安排加工工艺路线的能力。

《机械工程材料》全书共分为 13 章,按照性能→结构→组织(凝固)→工艺(变形,热处理)→成分(工程材料)→选材的顺序编写。课程内容可归纳为基础理论、各种工程材料和材料选用 3 大部分,各章之间关系的框架如图 1-2 所示。其中第 3 章“材料的凝固”、第 5 章“钢的热处理”、第 6 章“工业用钢”是本课程的重点内容。

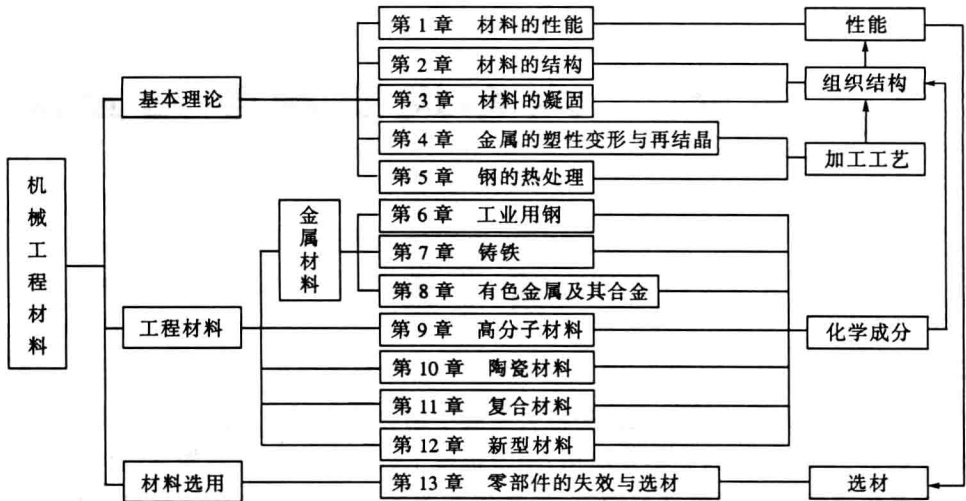


图 1-2 各章之间关系示意图

二、学习重点

1. 明确本课程的重要性及学习目的,抓住本课程学习的主线,即材料的化学成分、加工工艺对组织结构和性能的影响。
2. 掌握化学成分、组织和结构等基本概念。

第 1 章 材料的性能

一、内容提要

使用材料,是使用材料的性能。材料的性能分为使用性能和工艺性能两大类:材料的使用性能主要包括力学性能(机械性能)、物理性能和化学性能;材料的工艺性能主要包括铸造性能、锻造性能、切削加工性能、热处理性能、焊接性能等。材料的性能指标是设计、制造零件和工具的重要依据。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。常用的力学性能指标及说明见表 1-2。

工程材料中最常用的力学性能是强度、硬度、塑性和韧性。强度和硬度是金属材料抵抗塑性变形能力的标志。对于具有一定塑韧性的材料,硬度高,其强度也高。一些金属材料(不是所有金属材料)的硬度和强度大致成正比,如钢、铸铁和黄铜。

塑性是材料受力断裂前承受永久变形的能力。一般说,塑性高,韧性也高。但韧性与塑性是不同的概念,韧性是材料受力断裂前吸收能量能力的度量。在动载荷且存在缺口的情况下,用冲击试验来评价韧性,对于存在微裂纹和缺陷的材料则用断裂韧性评价。在静载荷条件下,韧性可通过应力-应变曲线下所包围的面积来确定。

表 1-2 常用的力学性能指标及说明

力学性能	性能指标		说明
	符号	名称	
刚度	E	弹性模量	低于比例极限的应力与相应应变的比值
强度	—	弹性极限	材料在应力完全释放时能够保持没有永久应变的最大应力
	R_m	抗拉强度(强度极限)	材料在断裂前与最大力 F_m 相对应的应力
	R_e	屈服强度(屈服极限)	材料在试验期间发生塑性变形而力不增加时的应力
	$R_{p0.2}$	规定塑性延伸强度(条件屈服强度)	规定塑性延伸率为 0.2% 时的应力
	σ_D	疲劳极限	材料经无数次应力循环后仍不发生断裂时的最大应力幅值
塑性	A	伸长率	试样拉断后,标距部分的残余伸长与原始标距之比的百分率。当试样标距长度与直径之比为 10 时,用 $A_{11.3}$ 表示;当试样标距长度与直径之比为 5 时,用 A 表示
	Z	断面收缩率	试样拉断后,横截面积的最大减缩量与原始横截面积之比的百分率
硬度	HBW	布氏硬度	材料抵抗通过硬质合金球压头施加试验力所产生永久压痕变形的度量单位
	HR(A,B,C,D,E,F,G,H,K,N,T)	洛氏硬度	材料抵抗通过硬质合金或钢球压头,或对应某一标尺的金刚石圆锥体压头施加试验力所产生永久压痕变形的度量单位
	HV	维氏硬度	正四棱锥体金刚石压头压入试样表面,所施加的载荷与压痕表面积的比值。根据载荷不同,分维氏硬度、小负荷维氏硬度、显微维氏硬度 3 种测定方法
韧性	K (KU KV)	冲击吸收能量	标准夏比缺口试样被一次冲断后,摆锤冲击前所具有的势能和试样断裂后残留的能量的差
	K_{Ic}	断裂韧度	材料抵抗内部裂纹失稳扩展能力的度量

二、学习重点

1. 对于表征材料的力学性能指标,包括 R_e 、 R_m 、 $R_{p0.2}$ 、 σ_{-1} 、 $A_{11.3}$ 、 A 、 Z 、 K 、 K_{Ic} 、HBW、HRC、HV、 E ,要能说明其物理意义和单位,其中重点是 R_e 、 $R_{p0.2}$ 、 R_m 、 σ_{-1} 、 A 、 Z 、 K 、HBW、HRC。

2. 掌握布氏硬度和洛氏硬度的优缺点及应用场合。

三、例题解析

【例 1】 一根直径为 3 mm、长度为 25 m 的钛丝,在 500 N 拉伸载荷作用下的伸长量是多少?(钛丝的变形为弹性变形,钛的弹性模量为 107 GPa)

解析 伸长量 ΔL 与应变 e 的关系为 $e = \Delta L/L_0$,在弹性变形范围内,应变通过虎克定律与弹性模量 E 联系在一起:

$$E = \frac{R}{e} = \frac{F/S_0}{\Delta L/L_0} = \frac{FL_0}{\Delta L(\pi D^2/4)}$$

式中, R 为应力; F 为载荷; S_0 为钛丝横截面积; L_0 为钛丝原始长度; D 为钛丝直径。

将已知条件代入上式得

$$\Delta L = \frac{4FL_0}{E\pi D^2} = \frac{4 \times (500 \text{ N}) \times (25\,000 \text{ mm})}{(107\,000 \text{ N/mm}^2) \times \pi \times (3 \text{ mm})^2} = 16.5 \text{ mm}$$

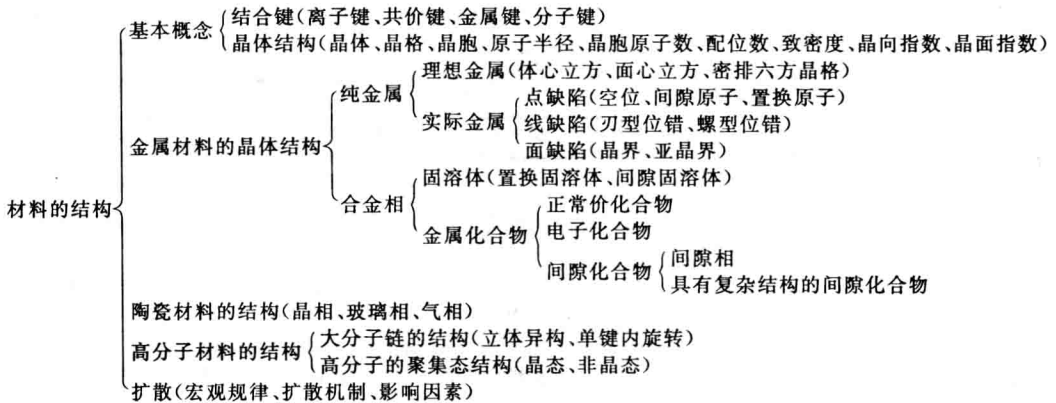
计算时应注意单位的统一,如 $1 \text{ GPa} = 1\,000 \text{ MPa} = 1\,000 \text{ MN/m}^2 = 1\,000 \text{ N/mm}^2$ 。

第 2 章 材料的结构

一、内容提要

物质都是由原子或分子组成的,原子或分子间的结合方式和排列方式,直接影响材料的性能。本章基本概念多,内容比较抽象,需要想象力并注意各部分的内在联系。

本章的内容概括如下:



固态物质中的原子、离子和分子之间的结合力称结合键,分为离子键、共价键、金属键、分子键。结合键的性质不同,材料的性能差异很大。

晶体是原子(离子、分子)在三维空间呈规则排列的固体。为研究方便,人为规定了晶格、晶胞、原子半径、晶胞原子数、配位数、致密度等基本概念和晶向指数、晶面指数等表示方法。

金属材料是应用最广泛的工程材料,本章重点介绍金属的晶体结构。3种常见纯金属的晶体结构总结于表 1-3。一些常见金属的原子半径和晶体结构列于表 1-4。

表 1-3 3种常见纯金属的晶体结构

晶格类型	英文缩写	晶格常数	晶胞原子数	原子半径	配位数	致密度	密排面	密排方向	常见金属
体心立方晶格	BCC (bcc)	a	2	$\frac{\sqrt{3}}{4}a$	8	0.68	{110}	$\langle 111 \rangle$	α -Fe、Cr、W、Mo、V、Nb、 β -Ti 等
面心立方晶格	FCC (fcc)	a	4	$\frac{\sqrt{2}}{4}a$	12	0.74	{111}	$\langle 110 \rangle$	γ -Fe、Ni、Al、Cu、Pb、Au、Ag 等
密排六方晶格	HCP (hcp)	a, c	6	$\frac{1}{2}a$	12	0.74	六方底面	底面对角线	α -Ti、Mg、Zn、Be、Cd 等

表 1-4 一些常见金属的原子半径和晶体结构

金属	晶体结构	原子半径	金属	晶体结构	原子半径	金属	晶体结构	原子半径	金属	晶体结构	原子半径
Al	FCC	0.143 1	Cu	FCC	0.127 8	Mo	BCC	0.136 3	Ta	BCC	0.143 0
Cd	HCP	0.149 0	Au	FCC	0.144 2	Ni	FCC	0.124 6	α -Ti	HCP	0.144 5
Cr	BCC	0.124 9	α -Fe	BCC	0.124 1	Pt	FCC	0.138 7	W	BCC	0.137 1
Co	HCP	0.125 3	Pb	FCC	0.175 0	Ag	FCC	0.144 5	Zn	HCP	0.133 2

实际金属的晶体结构是不完整的,存在着点、线、面三类晶体缺陷。点缺陷包括空位、间隙原子和置换原子,是通过使原子偏离平衡位置、引起晶格畸变来影响性能的。线缺陷(即位错)对金属的性能有着重要的影响,位错密度小,金属变形困难;位错密度大,互相缠结,因

而都使强度提高。面缺陷包括晶界和亚晶界，金属的晶粒越细，单位面积内的晶界面积越大，金属的强度、硬度越高，塑性、韧性越好。晶体缺陷是影响金属强度的本质因素。工程上实际应用金属材料的强化都是通过增加晶体缺陷、阻碍位错运动实现的。

金属和合金的组织都是由各种相的晶粒组成的，不同相晶粒之间的界面称相界，是晶界的一种。根据相结构的性质不同，合金中的相分为固溶体和金属化合物两类。根据溶质原子在溶剂晶格中所处的位置不同，固溶体又分为置换固溶体和间隙固溶体。与纯金属相比，固溶体的强度、硬度高，塑性、韧性低。金属化合物除结构与固溶体不同外，性能上比固溶体的熔点、硬度高，脆性大，可用分子式表示，常见的金属化合物是间隙化合物，它是许多合金的强化相。

陶瓷主要以化合物为原料，并经烧结成型，因而其结构要比金属复杂得多。高分子材料是由大分子链聚合而成的，大分子链的性质、形状和排列方式对材料的性能有着重要的影响。

扩散是由浓度梯度和热运动引起的原子定向运动，受温度、结构、缺陷等因素影响，它是金属固态转变的重要机制之一。

二、学习重点

1. 掌握晶体结构的各种基本概念、金属的 3 种典型晶体结构、实际金属中的 3 种类型晶体缺陷及合金的相结构；
2. 了解陶瓷及高分子材料的结构特点。

三、例题解析

【例 1】 在图 1-3 的立方晶系晶胞中画出 (201) 晶面和 [201] 晶向，确定晶面 AFL 的晶面指数和晶向 CL 的晶向指数。

解析 画晶面时注意先将三个指数值取倒数，所得到的倒数值就是该晶面在三个坐标轴上的截距值。本题中，先将晶面指数 (201) 中的 2、0、1 三个数取倒数，为 $\frac{1}{2}$ 、 ∞ 、1，即所求晶面在 X 轴上的截距为 $\frac{1}{2}$ ，Z 轴上的截距为 1，且平行于 Y 轴，据此便可画出 (201) 晶面(见图 1-3)。

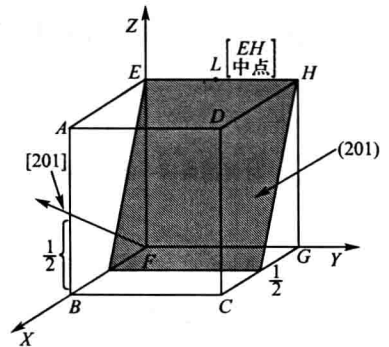


图 1-3

晶向 [201] 中的 2、0、1 三个数就是所求晶向上一点的坐标值。与这三个数成比例的点也是所求晶向上的点，如 $1、0、\frac{1}{2}$ 。找到这一点，连接原点与该点的连线即为 [201] 晶向(见图 1-3)。

确定 AFL 晶面指数时需将原点平移到 E 点，所求晶面在三个坐标轴的截距分别为 1、 $\frac{1}{2}$ 、-1，将这三个截距值取倒数、化为互质整数、加圆括号，变为 $(12\bar{1})$ ，即为 AFL 晶面的指数。下列晶面指数的写法是错误的： $(1, 2, \bar{1})$ 、 $(1.2, -1)$ 、 $(1 \frac{1}{2} \bar{1})$ 。

确定晶向 CL 的指数时，需将原点平移到 C 点，L 是 CL 晶向上的一点，L 点的坐标为 $-1、-\frac{1}{2}、1$ ，化为互质整数后加方括号变为 $[\bar{2} \bar{1} 2]$ ，即为 CL 的晶向指数。

【例2】 已知铜的原子半径为 $1.28 \times 10^{-10} \text{ m}$, 计算铜的密度。(铜为面心立方晶格, 相对原子质量为 63.5)

解析 密度为质量与体积之比。如果能知道晶胞内原子的总质量及晶胞的体积, 便可以计算密度。

$$\text{晶胞内原子的总质量} = n(A / N_A)$$

式中, n 为晶胞原子数; A 为摩尔质量(即相对原子质量, g/mol); $N_A = 6.023 \times 10^{23} / \text{mol}$ (阿伏加德罗常数); A / N_A 为一个原子的质量。

由面心立方晶格的原子半径 $r = a\sqrt{2}/4$, 得 $a = 2\sqrt{2}r$, 则面心立方晶格的晶胞体积 $V_c = a^3 = (2\sqrt{2}r)^3 = 16\sqrt{2}r^3$ 。

已知铜的摩尔质量 $A_{\text{Cu}} = 63.5 \text{ g/mol}$, 面心立方晶格的晶胞原子数为 4, 则铜的密度

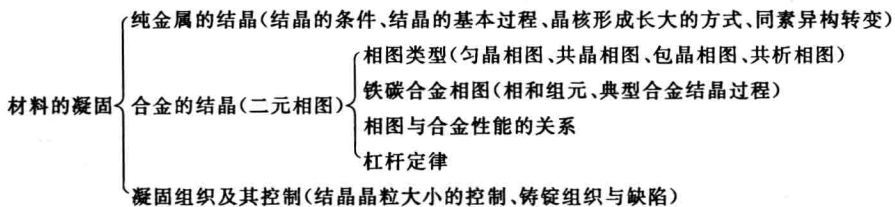
$$\begin{aligned} \rho &= \frac{nA_{\text{Cu}}}{V_c \cdot N_A} = \frac{nA_{\text{Cu}}}{a^3 \cdot N_A} = \frac{4 \times (63.5 \text{ g/mol})}{[16\sqrt{2} \times (1.28 \times 10^{-8} \text{ cm})^3] \times (6.023 \times 10^{23} / \text{mol})} \\ &= 8.89 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

该计算结果与文献中给出的铜的密度值 8.94 g/cm^3 非常接近。

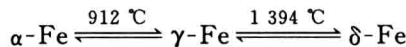
第3章 材料的凝固

一、内容提要

物质由液体转变为固体的过程称为凝固, 由液体转变为晶体的过程称为结晶。本章主要介绍金属的结晶, 内容概括如下:



了解结晶规律对于研究金属和合金的组织形成及转变有着重要意义。金属和合金的相变过程(包括结晶)都是由晶核形成和晶核长大两个基本过程组成, 发生相变的必要条件是过冷或过热。实际金属结晶时晶核多呈树枝状长大。通过控制形核率和长大速度, 可以控制相变后的晶粒大小。同素异构转变是一种固态转变, 最重要的同素异构转变是纯铁的同素异构转变:



合金的固态转变除结构变化外, 还伴随着成分的变化。

相图是表示合金系中各合金在极其缓慢的冷却条件下结晶过程的简明图解。它是制订熔炼、铸造、热加工及热处理工艺的重要依据, 是研究材料的成分、组织、性能之间关系的有力工具。常见二元合金相图的基本类型见表 1-5。

杠杆定律表示了合金在平衡状态下两平衡相的成分与相对质量之间的关系, 它只适用于二元相图的两相区, 利用杠杆定律可计算给定温度下合金中两平衡相或两组织组成物的相对质量百分比。在杠杆定律中, 杠杆的支点是合金的成分, 杠杆的端点是两平衡相或两组

织组成物的成分, 杠杆的位置取决于给定的温度, 杠杆中各线段(成分线段) 的长度为所取线段两端点对应成分的差值。

表 1-5 常见二元合金相图的基本类型

相图类型	相图特征	反应名称	反应式	说明
匀晶相图		匀晶反应	$L \rightarrow \alpha$	液相在变温过程中转变为单一固相
共晶相图		共晶反应	$L \rightarrow \alpha + \beta$	恒温下由一个液相同时结晶出两个成分结构不同的固相
包晶相图		包晶反应	$\alpha + L \rightarrow \gamma$	恒温下由一个液相包着一个固相生成一个新的固相
共析相图		共析反应	$\gamma \rightarrow \alpha + \beta$	恒温下由一个固相同时析出两个成分结构不同的新固相
形成稳定化合物相图		结晶	$L \rightarrow K$ (K表示化合物)	化合物在相图中为一垂线, 垂线的顶点是其熔点, 垂足是其成分

铁碳合金相图是二元合金相图的综合应用。它揭示了钢铁材料的成分和组织随温度的变化规律, 是本章也是本课程的重点内容。铁碳合金相图是研究钢铁材料的成分、相和组织变化规律以及与性能之间关系的重要工具。铁碳合金相图由 3 部分(包晶、共晶、共析) 组成。其中共析部分最重要, 其次是共晶部分。铁碳合金相图各区域的相组成物和组织组成物标注如图 1-4 所示。利用铁碳合金相图可对钢铁材料进行分类。通过对典型合金结晶过程的分析, 可确定室温下各合金的相组成和组织组成。利用杠杆定律可计算相组成物和组织组成物在合金中所占的质量百分比, 见表 1-6。

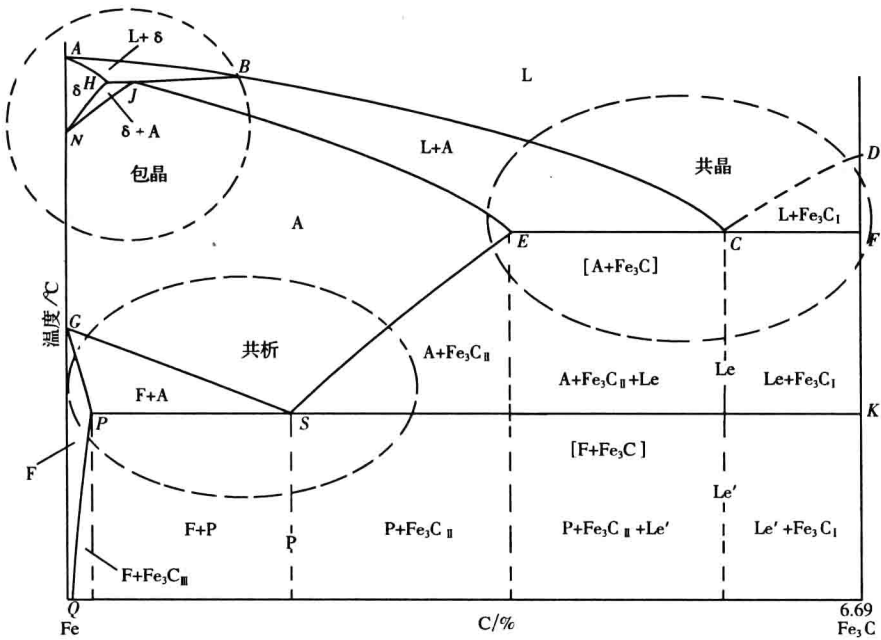


图 1-4 铁碳合金相图

表 1-6 铁碳合金的分类及室温平衡组织中组织组成物和相组成物的杠杆定律计算

铁碳合金	C/%	组织组成物	组织组成物的相对质量百分比	相组成物	相组成物相对质量百分比
工业纯铁	0 ~ 0.000 8	F	$Q_F = 100\%$	F	$Q_F = 100\%$
	0 ~ 0.021 8	F + Fe ₃ C _Ⅲ	$Q_{Fe_3C_{Ⅲ}} = \frac{C - 0.000\ 8}{6.69 - 0.000\ 8} \times 100\%$ $Q_F = \frac{6.69 - C}{6.69 - 0.000\ 8} \times 100\%$ $= 100\% - Q_{Fe_3C_{Ⅲ}}$	F + Fe ₃ C	$Q_{Fe_3C} = \frac{C - 0.000\ 8}{6.69 - 0.000\ 8} \times 100\%$ $Q_F = \frac{6.69 - C}{6.69 - 0.000\ 8} \times 100\%$ $= 100\% - Q_{Fe_3C_{Ⅲ}}$
钢	亚共析 0.021 8 ~ 0.77	F + P	$Q_P = \frac{C - 0.000\ 8}{0.77 - 0.000\ 8} \times 100\%$ $Q_F = \frac{0.77 - C}{0.77 - 0.000\ 8} \times 100\%$ $= 100\% - Q_P$		
	共析 0.77	P	$Q_P = 100\%$		
	过共析 0.77 ~ 2.11	P + Fe ₃ C _Ⅱ	$Q_{Fe_3C_{Ⅱ}} = \frac{C - 0.77}{6.69 - 0.77} \times 100\%$ $Q_P = \frac{6.69 - C}{6.69 - 0.77} \times 100\%$ $= 100\% - Q_{Fe_3C_{Ⅱ}}$		
白口铸铁	亚共晶 2.11 ~ 4.3	P + Fe ₃ C _Ⅱ + Le'	$Q_{Le'} = Q_{Le} = \frac{C - 2.11}{4.3 - 2.11} \times 100\%$ $Q_{Fe_3C_{Ⅱ}} = \frac{4.3 - C}{4.3 - 2.11} \times \frac{2.11 - 0.77}{6.69 - 0.77} \times 100\%$ $Q_P = 100\% - Q_{Le'} - Q_{Fe_3C_{Ⅱ}}$		
	共晶 4.3	Le'	$Q_{Le'} = 100\%$		
	过共晶 4.3 ~ 6.69	Le' + Fe ₃ C _I	$Q_{Fe_3C_{I}} = \frac{C - 4.3}{6.69 - 4.3} \times 100\%$ $Q_{Le'} = \frac{6.69 - C}{6.69 - 4.3} \times 100\%$ $= 100\% - Q_{Fe_3C_{I}}$		

说明: 表中符号“C”表示“碳含量 × 100”。

随着碳含量的增加, 铁碳合金室温平衡组织的变化为 F → F + Fe₃C_Ⅲ → F + P → P → P + Fe₃C_Ⅱ → P + Fe₃C_Ⅱ + Le' → Le' → Le' + Fe₃C_I → Fe₃C_I, 如图 1-5 所示。

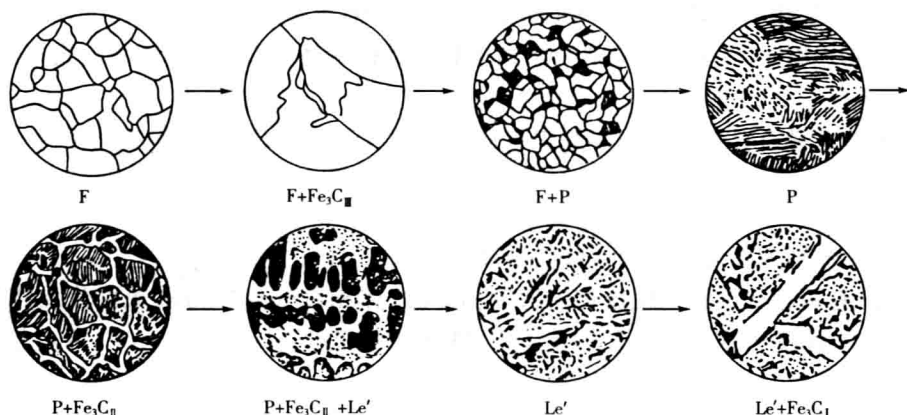


图 1-5 铁碳合金在室温下的平衡组织示意图

二、学习重点

1. 在了解金属结晶过程中过冷度、形核和长大等概念的基础上,重点掌握影响晶粒大小的因素和铁的同素异构转变。能熟练应用杠杆定律。

2. 熟练掌握铁碳合金相图,做到能默画全图,并标出图中各特征点的符号、温度和成分,填上各区域的相组成物和组织组成物。画出各典型合金的冷却曲线和组织转变示意图,应用杠杆定律计算各典型合金(重点是钢的部分)室温平衡组织中各相和各组织组成物的相对质量百分比。

3. 弄清铁碳合金的成分、组织和性能之间的关系,即随着碳含量的变化,其组织和性能的变化规律。

三、例题解析

【例 1】 已知铁素体的 $R_m = 180 \sim 230$ MPa,珠光体的 $R_m = 770$ MPa,试计算 40 钢的抗拉强度(R_m)。

解析 40 钢是两相(F+FeC)的机械混合物,也是两个组织组成物(F+P)的机械混合物。要想求 40 钢的强度,必须先求出两个组分的相对质量百分比,而巳知条件中给出的是铁素体和珠光体的性能,即两个组织组成物的性能,所以需先求出 40 钢组织组成物的相对质量百分比。

根据杠杆定律

$$Q_F = \frac{0.77 - 0.40}{0.77 - 0.0008} \times 100\% = 48.1\%, \quad Q_P = 100\% - 48.1\% = 51.9\%$$

40 钢的抗拉强度为

$$\begin{aligned} R_m &= [Q_F(R_m)_{F_{\text{F限}}} + Q_P(R_m)_P] \sim [Q_F(R_m)_{F_{\text{E限}}} + Q_P(R_m)_P] \\ &= (0.481 \times 180 \text{ MPa} + 0.519 \times 770 \text{ MPa}) \sim (0.481 \times 230 \text{ MPa} + 0.519 \times 770 \text{ MPa}) \\ &= 486.21 \text{ MPa} \sim 510.26 \text{ MPa} \end{aligned}$$

【例 2】 某亚共析钢显微组织中,珠光体的面积占 20%,该钢的碳含量是多少?钢中共析铁素体的质量百分比是多少?

解析 利用书中的公式 $C\% = P_{\text{面积}}\% \times 0.77\%$ 可直接计算钢的碳含量: $C\% = 20\% \times 0.77\% = 0.154\%$ 。问题在于计算的依据,即珠光体的面积百分比是否等于质量百分比。巳

经证明,合金中各相或组织组成物的面积百分比与其体积百分比相等,但体积百分比 $V_P = V_P / (V_P + V_F)$ [式中, V_P 和 V_F 分别为珠光体和铁素体的体积百分比] 却不一定等于质量百分比。

珠光体的质量百分比与钢中各组织组成物的体积百分比、密度之间的关系为

$$Q_P = \frac{V_P \rho_P}{V_P \rho_P + V_F \rho_F} = \frac{V_P}{V_P + V_F (\rho_F / \rho_P)}$$

式中, ρ_P 和 ρ_F 分别为珠光体和铁素体的密度。

可见,只有两相或两组织组成物的密度相等时,体积百分比才与质量百分比相等。对于铁碳合金,渗碳体的密度 $\rho_{Cm} = 7.66 \text{ g/cm}^3$,铁素体的密度 $\rho_F = 7.8 \text{ g/cm}^3$,两者相近,所以可用体积百分比代替质量百分比。

钢中铁素体总质量是先共析铁素体与共析铁素体(即珠光体中的铁素体)的质量之和,已知先共析铁素体的质量百分比 $Q_{先共析} = 100\% - 20\% = 80\%$ 。因所有铁素体(即铁素体相)占合金的质量百分比为 $Q_F = \frac{6.69 - 0.154}{6.69 - 0.0008} = 97.7\%$ 。所以共析铁素体的质量百分比为

$$Q_{共析} = Q_F - Q_{先共析} = 97.7\% - 80\% = 17.7\%$$

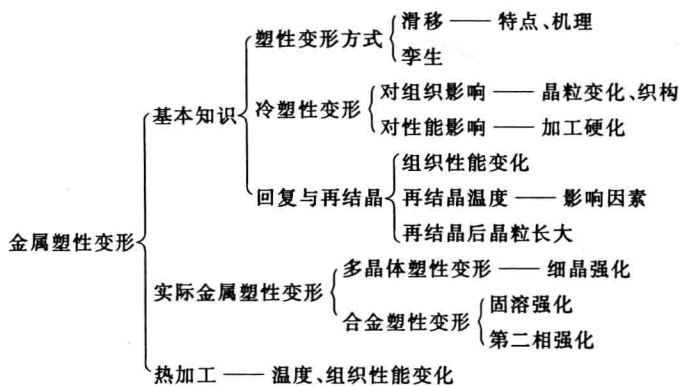
另一种计算方法为

$$Q_{共析} = \frac{6.69 - 0.77}{6.69 - 0.0008} \times 20\% = 17.7\%$$

第 4 章 金属的塑性变形与再结晶

一、内容提要

塑性变形是金属在外力作用下所发生的不可恢复的变形。金属在冷塑性变形及随后的加热过程中,其内部的组织和结构将发生变化,并给性能带来重大的影响。本章的内容概括如下:



金属的塑性变形有滑移和孪生两种方式。滑移是金属塑性变形的主要方式,它是通过滑移面上位错的运动来实现的。一个滑移面和其上的一个滑移方向构成一个滑移系,滑移系越多,金属的塑性越好。

对于多晶体金属,由于晶界和晶粒位向的影响,使位错运动阻力增大,变形更加均匀,韧

脆转变温度下降。晶粒越细,金属的强度、硬度越高,塑性、韧性越好,即细晶强化。

合金发生塑性变形时,由于固溶体中的溶质原子使晶格发生畸变和对位错的钉扎作用而产生固溶强化。当合金中出现颗粒状化合物第二相时,其对位错运动有阻碍作用,产生弥散强化或第二相强化。

由于冷塑性变形使金属的空位密度增加、位错密度增加、亚结构细化,以及产生几何硬化,因而产生加工硬化,即随着冷塑性变形量增加,金属的强度、硬度提高,塑性、韧性下降。

冷塑性变形金属加热时,随温度升高,将发生回复、再结晶和晶粒长大。再结晶使金属的组织性能恢复到塑性变形前的水平,加工硬化消失。再结晶温度与预先变形度、金属的纯度和加热条件有关,纯金属再结晶温度与熔点的关系为 $T_{\text{再}}(\text{K}) = 0.4T_{\text{熔}}(\text{K})$ 。再结晶后晶粒的大小除了与加热温度有关外,还与预先变形度有关,对一般金属,当变形度为 2% ~ 10% 时,由于变形极不均匀,会造成晶粒异常长大,应予避免。

再结晶温度是金属冷热加工的分界线,热加工对金属的组织性能同样有着重要影响。

二、学习重点

1. 了解滑移变形的特点、机理及常见 3 种金属晶格滑移系的比较;
2. 了解金属经冷塑性变形后加热及热加工时组织性能的变化;
3. 掌握金属材料的基本强化方法(细晶强化、固溶强化、弥散强化、加工硬化)。

三、例题解析

【例 1】 金属铸件中粗大的晶粒为什么不能通过再结晶退火细化?如何细化金属铸件的晶粒?

解析 再结晶的发生是有前提条件的,即金属须经过冷塑性变形(大于临界变形度)。金属铸件不能(也不允许)进行塑性变形,即使将铸件在再结晶退火温度(低于临界点)下加热,其组织也不会发生变化,所以再结晶退火不可能细化金属铸件的晶粒。

铸件晶粒的细化可以通过两种途径实现。一是在铸造的结晶过程中,通过增加过冷度、变质处理或机械振动搅拌来细化结晶晶粒。二是在铸件凝固后的固态下,如果铸件金属存在固态相变,可通过固态相变来细化晶粒,因为固态相变是一个晶核形成和长大的过程,控制得好,就可以使晶粒细化。

第 5 章 钢的热处理

一、内容提要

热处理是将金属材料在固态下加热、保温和冷却,通过改变其组织结构来获得所需性能的一种工艺。热处理是改善金属材料,特别是钢铁材料的使用性能和工艺性能的一种重要的工艺方法,是本课程的重点之一。本章内容概括如下: