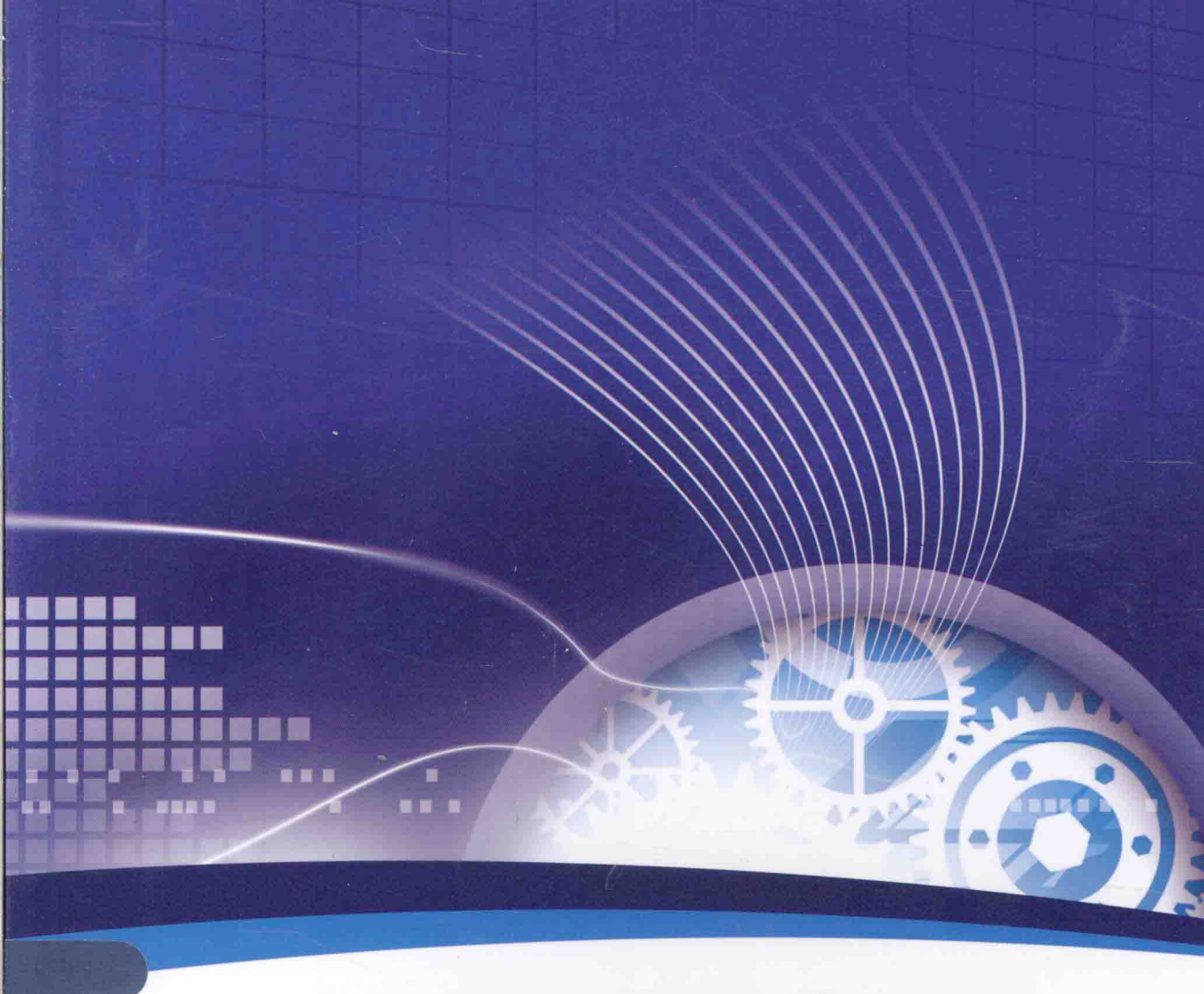




模具工程材料 习题与学习指导

Muju Gongcheng Cailiao
Xiti yu Xuexi Zhidao

◎主 编 丛树毅 白兆川



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

014056909

TG760.4
03

模具工程材料习题 与学习指导

主 编 丛树毅 白兆川
副主编 刘战涛



 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



北航

C1741887

TG 760.4
03

002820310

内 容 简 介

本书共分为知识点强化训练以及自测题两个部分。知识点简明扼要,层次清晰,重点掌握部分辅以相关例题加深理解,更有大量练习帮助学生将所学知识灵活掌握,理论联系实际。

本书适用于广大机械模具类相关专业的学生。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

模具工程材料习题与学习指导/丛树毅,白兆川主编. —北京:北京理工大学出版社, 2014. 6

ISBN 978-7-5640-9357-0

I. ①模… II. ①丛… ②白… III. ①模具-工程材料-高等学校-教学参考资料 IV. ①TG76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 123444 号

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京国马印刷厂

开 本/787 毫米×960 毫米 1/16

印 张/10.5

字 数/213 千字

版 次/2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

定 价/32.00 元

责任校对/陈玉梅

责任印制/吴皓云

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

本书总体分为两个层次：

1. 知识回顾+强化训练——将全部内容以简明扼要的方式有条理地进行归纳，并将知识分为“了解”、“识记”和“掌握”三个层次，其中★代表需要学生简单了解的内容，★★代表需要学生熟识记忆的内容，★★★则代表学生必须灵活掌握和实践应用的内容。待学生完全掌握各章节的学习内容后，配合强化训练巩固和加强对知识点的理解。

2. 自测题——编者通过多年研究而精心编制的模拟题，作为学生进行自我验收的工具。

编者在编写过程中参阅了大量国内外同行的专著、教材、文献资料等，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中必然存在不妥之处，难免出现疏漏和错误，敬请各位读者批评指正。

编 者

(22) 金属自

第一章 金属的晶体结构与合金相结构	(1)
【知识回顾】	(1)
【强化训练一】	(13)
第二章 钢铁材料的热处理	(17)
【知识回顾】	(17)
【强化训练二】	(34)
第三章 黑色金属材料	(38)
【知识回顾】	(38)
【强化训练三】	(53)
第四章 非铁合金	(56)
【知识回顾】	(56)
【强化训练四】	(74)
第五章 非金属材料	(77)
【知识回顾】	(77)
【强化训练五】	(81)
第六章 复合材料	(83)
【知识回顾】	(83)
【强化训练六】	(85)
第七章 机械零件失效及选材原则	(86)
【知识回顾】	(86)
【强化训练七】	(92)

第八章 新材料概述	(94)
【知识回顾】	(94)
【强化训练八】	(97)
自测题	(98)
附录1 强化训练题答案	(113)
附录2 自测题答案及解析	(140)
参考文献	(162)

第一章

金属的晶体结构与合金相结构

知识回顾

一、金属的晶体结构

★★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。

① 工艺性能：指金属材料在加工过程中反映出的性能，如铸造性能、焊接性能、切削加工性能等。

② 使用性能：指金属材料在使用条件下表现出来的性能，如物理性能、化学性能、力学性能。

★★2. 金属的力学性能

金属材料的力学性能是指材料在外加载荷作用时所表现出来的性能。包括强度、硬度、塑性、韧性及疲劳性能等。

(1) 强度

强度是指材料在外力作用下抵抗变形和破坏的能力，包括抗拉强度、抗弯强度、抗压强度等。由图 1-1 可知，在载荷较小的 Oe 段，试样的伸长量随载荷增加而增加。外力去除后试样恢复原状，这种变形称为弹性变形。超过 e 点后则进入“弹—塑”性变形阶段，在这一阶段若除去外力，试样不能完全恢复原状。当载荷增加到 p_s 时，拉伸曲线在 s 点后出现了水平段，表示载荷保持不变时，试样继续明显伸长，这种现象称为屈服。该变形为塑性变形，无法恢复原状。

① 弹性极限：材料能承受的不产生塑性变形的最大应力，用 σ_e 表示。

② 强度极限：物体在外力作用下发生破坏时出现的最大应力，也可称为破坏强度或破

坏应力。

③ 屈服强度：材料开始产生屈服现象时所对应的外加应力，用 σ_s 表示。

④ 屈服：材料在外应力不再增加的情况下，塑性变形继续显著增加的现象。

由于大多数金属材料没有明显的屈服点，国家标准中规定，塑性变形量达到 2% 时所对应的外加应力为条件屈服强度。用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

(2) 塑性

塑性是指在外力作用下，材料产生永久变形而不被破坏的能力。常用的塑性指标是延伸率 (σ) 和断面收缩率 (ψ)。即

$$\sigma = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%, \quad \psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\%$$

式中 l_0 ——试样原标距长度 (mm)；

l_1 ——试样拉断后标距长度 (mm)；

F_0 ——试样原始横截面积 (mm^2)；

F_1 ——试样断裂处的横截面积 (mm^2)。

(3) 硬度

硬度是指材料的软硬程度。它表明了材料抵抗表面局部塑性变形及破坏的能力，也就是抵抗硬物压入或划伤表面的能力。常用的硬度测量方法是压入法，主要有布氏硬度 (HB)、洛氏硬度 (HR)、维氏硬度 (HV) 等。

★3. 金属的晶体结构

材料的力学性能取决于其组织结构。“组织”是指用肉眼或光学显微镜观察到的内部构造的图像，如金属的晶粒。“结构”是指利用射线分析等方法测得的原子间的相互关系及排列方式，如金属的晶体结构。“组织”与“结构”只是材料内部构造不同尺度的两个概念。下面回顾一下几个基本概念。

(1) 基本概念

① 金属的晶体结构：指金属材料内部原子的排列规律。它决定着材料的显微组织特性和材料的宏观性能。

② 晶界：晶粒与晶粒之间的界面。

③ 晶格：用于描述原子在晶体中排列规律的三维空间几何点阵（把原子看成是一个几何质点，把原子之间的相互联系与作用假想为几何直线）。

④ 晶胞：晶格中能够代表晶格特征的最小几何单元。

晶体、晶格以及晶胞结构如图 1-2 所示。

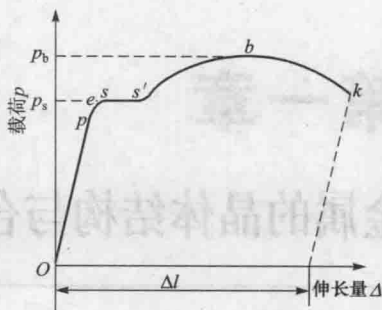


图 1-1 低碳钢的拉伸曲线

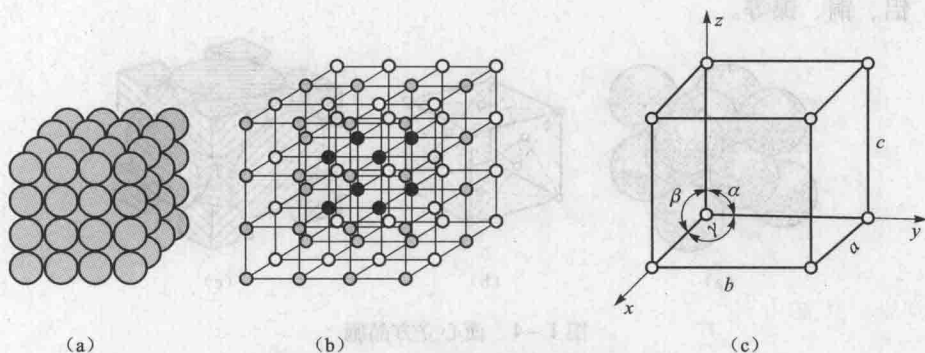


图 1-2 晶体 晶格 晶胞

(a) 晶体; (b) 晶格; (c) 晶胞

⑤ 晶系：根据晶体的特征对称元素所进行的分类。晶体根据其在晶体理想外形或综合宏观物理性质中呈现的特征，对称元素可划分为立方、六方、三方、四方、正交、单斜、三斜 7 类。

⑥ 立方晶系（等轴晶系）：4 个立方体对角线方向的三重轴。

⑦ 各向异性：在晶体中由于各晶面和各晶向上的原子排列密度不同，因而在同一晶体的不同晶面和晶向上的各种性能不同的现象。

⑧ 晶体缺陷：主要有点缺陷、线缺陷、面缺陷 3 种。点缺陷有晶格空位、置换原子和间隙原子。形成原因：主要由于原子在平衡位置上做不停的热运动；面缺陷有晶界和亚晶界两种。形成原因：由于受到其两侧的不同晶格位向的晶粒或亚晶粒的影响使原子成不规则排列。

(2) 金属中常见晶格

① 体心立方（如图 1-3 所示）：立方体八个角上各有一个原子，体心处有一个原子。每个晶胞中原子数为： $1/8 \times 8 + 1 = 2$ 。属于体心立方晶格的常用金属为 α 铬、钨、钼、钒、 α 铁、 β 钛、铌等。

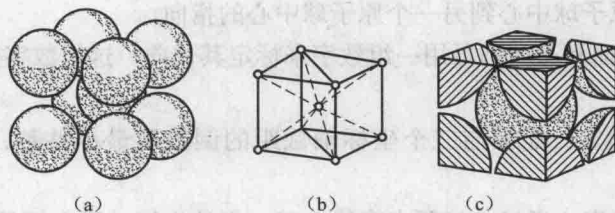


图 1-3 体心立方晶胞

(a) 钢球模型; (b) 晶格模型; (c) 晶胞原子数

② 面心立方（如图 1-4 所示）：晶胞的八个角上各有一个原子，立方体六个面的面心各有一个原子。每个晶胞中原子数为： $1/8 \times 8 + 1/2 \times 6 = 4$ 。属于面心立方晶格的常用金属

为 γ 铁、铝、铜、镍等。

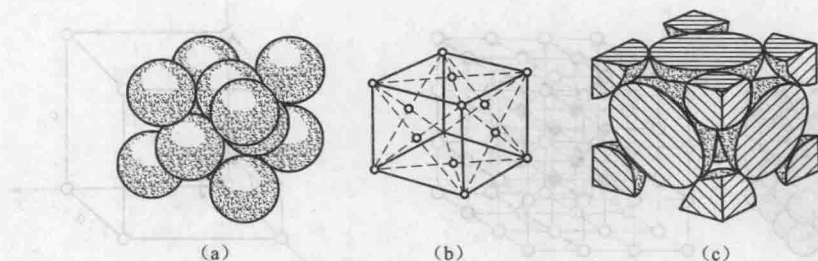


图 1-4 面心立方晶胞

(a) 钢球模型; (b) 晶格模型; (c) 晶胞原子数

③ 密排立方 (如图 1-5 所示): 每个晶胞中原子数为: $6 = 1/6 \times 12 + 1/2 \times 2 + 3$ 。属于密排六方晶格的常用金属: 镁、锌、铍、 α 钛、镉等。

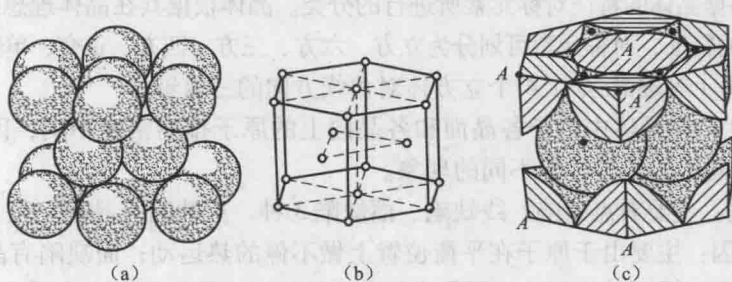


图 1-5 密排立方晶胞

(a) 钢球模型; (b) 晶格模型; (c) 晶胞原子数

(3) 晶面指数与晶向指数

① 晶面: 晶体中由物质质点所组成的平面。

② 晶向: 一个原子球中心到另一个原子球中心的指向。

每一组平行的晶面和晶向都可用一组数字来标定其位向。这组数字分别称为晶面指数和晶向指数。

③ 晶面指数的确定: 晶面与三个坐标轴截距的倒数取最小整数, 用圆括号表示。如 (111)、(112)。

④ 晶向指数的确定: 通过坐标原点直线上某一点的坐标, 用方括号表示。如 [111]。

二、金属的合金相结构

★★1. 合金的相结构

(1) 合金的晶体结构基本概念

① 合金：是指由一种金属元素与另外一种或多种金属或非金属元素，通过熔炼或烧结等方法所形成的具有金属性质的新金属材料。如碳素钢（铁、碳）、黄铜（铜、锌）、铅青铜（铜、锌、铅）。

② 组元：组成合金的最基本的、能独立存在的物质。组成合金的各个化学元素及稳定的化合物都是组元。合金中有几种组元就称之为几元合金。如碳素钢是二元合金，铅青铜是三元合金。

③ 合金系：是指具有相同组元，而成分比例不同的一系列合金。如各种碳素钢。

④ 相：是指在合金中，凡是化学成分相同、晶体结构相同并有界面与其他部分分隔开来的一个均匀区域。在一个相中可以有多个晶粒，但是一个晶粒中只能是同一个相。

⑤ 显微组织：是指在显微镜下看到的相和晶粒的形态、大小和分布。它可以看做是由各个相组成的。合金的显微组织可以看做是由各个相所组成的，这些相称为合金组织的相组成物；也可以看做是基本组织所组成的，这些基本组织称为合金组织的组织组成物。合金的力学性能不仅取决于它的化学成分，更取决于它的显微组织。

(2) 合金的晶体结构

合金的晶体结构是指合金中各个相的晶体结构，简称相结构。合金中有两类基本的相结构，固溶体和金属化合物。

① 固溶体。

a. 固溶体：合金结晶成固态时，溶质原子分布在溶剂晶格中形成的一种与溶剂有相同晶格的相。

b. 固溶体与溶剂具有相同晶体结构。

c. 固溶体的类型：

- 间隙固溶体指溶质原子分布于溶剂的晶格间隙中所形成的固溶体。都是有限固溶体，也是无序固溶体；

- 置换固溶体指溶质原子代替溶剂原子占据着溶剂晶格结点位置而形成的固溶体。置换固溶体可以是有限固溶体也可以是无限固溶体。

间隙、置换固溶原子模型示意图如图 1-6 所示。

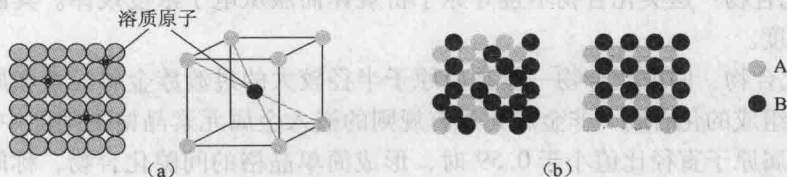


图 1-6 间隙、置换固溶原子模型示意图

(a) 间隙固溶体原子模型示意图；(b) 置换固溶体原子模型示意图

- d. 有限固溶体：固溶体的溶解度是有限的。
- e. 无限固溶体：固溶体的溶解度是无限的。（组成固溶体的两种元素随比例不同可以互为溶质或溶剂。）
- f. 形成无限固溶体的必要条件：是溶剂与溶质的晶体结构相同。
- g. 无序固溶体：溶质原子的分布是无序的。
- h. 有序固溶体：溶质原子的分布是有序的。
- i. 固溶体的有序化：无序固溶体向有序固溶体的转变过程。转变过程中硬度和脆性增加，塑性下降。
- j. 溶解度：溶质在固溶体中的极限浓度称为溶质在固溶体中的溶解度。
- k. 影响固溶体溶解度的主要因素：
- 原子直径因素；
 - 晶体结构因素；
 - 元素的负电性；
 - 电子浓度；
 - 温度。

② 金属化合物。

a. 金属化合物：合金中各组元按一定方式形成的一种新晶体。金属化合物一般都具有复杂的晶格结构，熔点高，硬而脆。在合金中，金属化合物的多少、形态、大小、分布等对合金的性能有不同的影响。金属化合物的晶格类型不同于任一组元，如碳钢中的渗碳体（ Fe_3C ）是铁与碳形成的金属化合物，其晶格类型既不同于铁，也不同于碳。

Fe_3C 复杂晶格如图 1-7 所示。

b. 金属化合物的基本类型：

- 正常价化合物：这类化合物符合正常的原子价规律，是成分固定并有严格分子式的金属化合物。
- 电子化合物：这类化合物不遵守原子价规律而服从电子浓度规律。其晶体结构主要取决于电子浓度。
- 间隙化合物：间隙化合物一般是由原子半径较大的过渡族金属元素和原子半径较小的非金属元素组成的化合物（非金属元素有规则的嵌入金属元素晶格的间隙中）。当非金属原子直径与金属原子直径比值小于 0.59 时，形成简单晶格的间隙化合物，称间隙相。当非金属原子直径与金属原子直径比值大于 0.59 时，则不能产生间隙相，而形成复杂结构的间隙化合物。

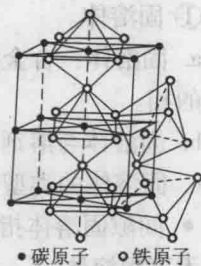


图 1-7 Fe_3C 复杂晶格

★★★2. 二元合金相图

二元合金相图是表示二元合金系中不同成分的合金，在温度极缓慢变化条件下，在不同温度下的相组成和相变化的图。所谓二元合金系是指某两种元素组成的各种不同成分合金的总和。合金相图是制定铸造、锻造、热处理等工艺的重要依据，也是分析合金组织、组织转变以及合金性能的根据。

相图是表示在平衡状态下合金的化学成分、相、组织与温度的关系图（平衡状态图）。

平衡状态下是指极缓慢的冷却速度下。

(1) 二元合金相图基本类型

匀晶相图；共晶相图；包晶相图。

① 匀晶相图是指合金组元在液、固两相下均能无限互溶，结晶时只结晶出单相固溶体组织的合金相图。如 Au - Ag、Ni - Cu 等二元合金系。下面以 Ni - Cu 相图（图 1-8 所示）为例介绍相图的建立。

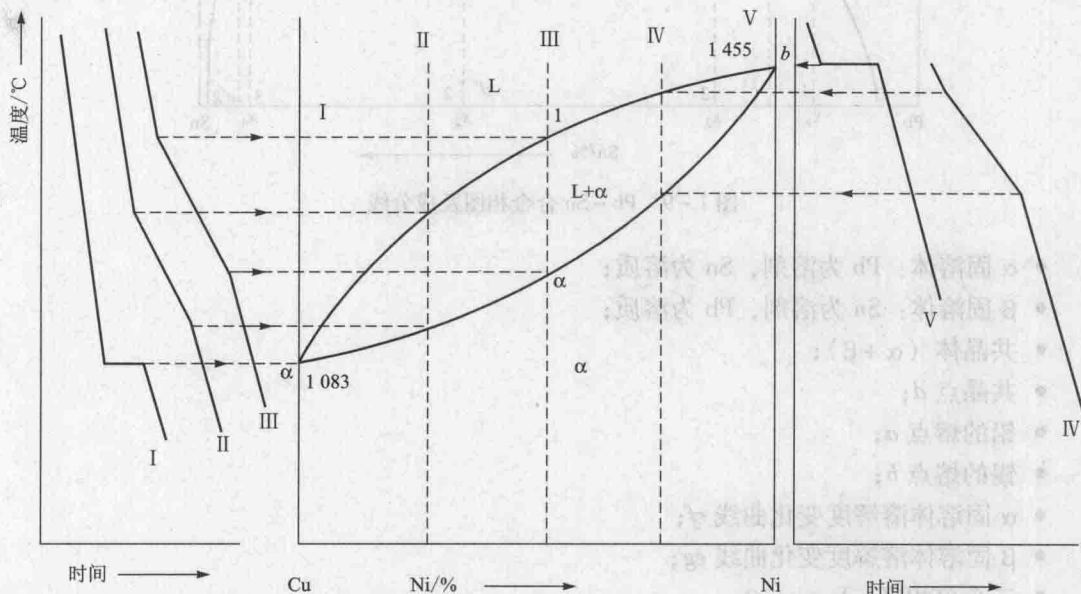


图 1-8 Ni - Cu 相图

- 配制不同成分的铜镍合金。
- 测出每种合金的冷却曲线并找出其相变温度。
- 在温度 - 成分坐标中标出各成分合金的相变点（横坐标为镍的质量分数）。
- 将各意义相同的点连接起来，就得到铜镍二元合金相图。

② 匀晶转变是由液相直接结晶成单相固溶体的结晶转变。

a. 共晶相图是具有两相机械混合物的合金相图（或者说以共晶转变为主的相图）。

b. 图 1-9 所示为 Pb-Sn 合金相图及成分线。

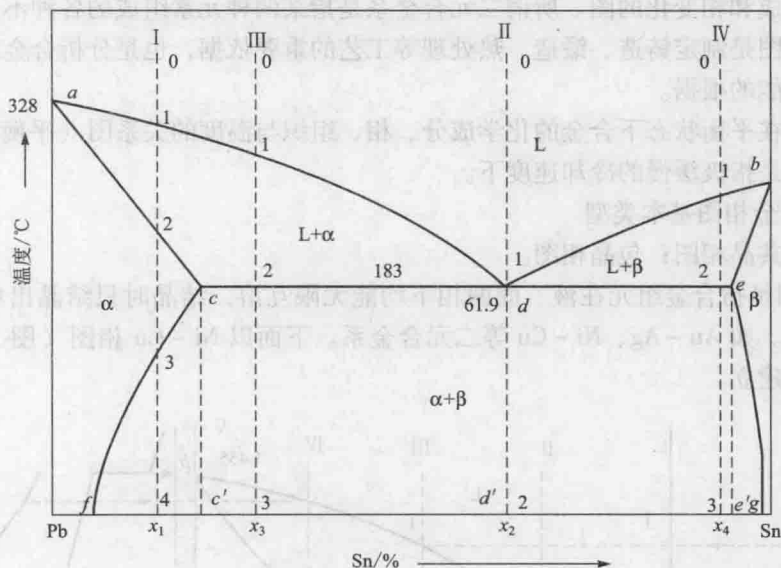


图 1-9 Pb-Sn 合金相图及成分线

- α 固溶体: Pb 为溶剂, Sn 为溶质;
- β 固溶体: Sn 为溶剂, Pb 为溶质;
- 共晶体 ($\alpha + \beta$);
- 共晶点 d;
- 铅的熔点 a;
- 锡的熔点 b;
- α 固溶体溶解度变化曲线 cf;
- β 固溶体溶解度变化曲线 eg;
- 三个单相区: L、α、β;
- 液相线 adb;
- 固相线 acdeb;
- 共晶线 cde;
- 三个两相区: L+α、L+β、α+β;
- 一个三相区: L+α+β, 在共晶转变过程中三相同步存在。

③ 共晶转变是一定化学成分的合金在一定的温度下（恒温），同时由液相中结晶出两种不同成分和不同晶体结构的固相，形成的固定化学成分的基本组织被统称为共晶体，该过程

为共晶转变。

a. 包晶相图：两组元在液态下相互无限溶解，在固态下相互有限溶解，并发生包晶转变的相图，叫做包晶相图。如图为铁碳合金的包晶转变。包晶转变是由液相和一种固相转变为另一种固相的过程。

b. 结晶过程：

- 金属的结晶过程包括成核和长大两个基本过程。
- 晶核是作为结晶核心的极细小的固相晶体。晶核长大就是晶核的固体界面向母相内不断地推进。晶核形成后即不断吸附周围液体中原子，使它们按一定的排列规律附着在这些晶核上。与此同时，在液态金属中又不断产生新的晶核，新晶核又不断长大。直到液态金属全部消失为止。每个晶核长大后即成为一个晶粒，同时相邻晶粒之间自然形成了晶界。晶核长大方式有树枝状长大和平面长大。

★★★3. 铁碳合金相图

钢铁是现代工业中应用最广泛的金属材料，其基本组元是铁和碳两个元素，故统称为铁碳合金。普通碳钢和铸铁均为铁碳合金，合金钢和合金铸铁也是在此基础上加入合金元素而形成的特殊铁碳合金。铁碳合金相图是研究在平衡状态下铁碳合金成分、组织和性能之间的关系及其变化规律的重要工具，对于制定铁碳合金材料的加工工艺具有重要指导意义。铁与碳可以形成 Fe_3C 、 Fe_2C 、 FeC 等一系列稳定的化合物，而稳定的化合物可以作为一个独立的组元，因此整个铁碳合金相图可视为由 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 、 $\text{Fe}_2\text{C}-\text{Fe}_3\text{C}$ 、 $\text{Fe}-\text{FeC}$ 等一系列二元相图组成。由于碳质量分数超过 5% 的铁碳合金很脆，无实用价值，所以我们研究的铁碳合金相图，实际上是 Fe 和 Fe_3C 两个基本组元的 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图。

(1) $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图

由于相图中左上角转变部分由于实用意义不大，为便于研究和分析，可予以省略简化。

$\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 状态图包晶部分如图 1-10 所示。

① 图中主要特性点其意义：

a. A 点——纯铁的熔点。

b. D 点——渗碳体的熔点。

c. C 点——共晶点 ($w_{\text{C}} = 4.3\%$)。此点上的液态合金将发生共晶转变，液相在恒温下，同时结晶出奥氏体和渗碳体所组成的混合物。此共晶转变后所获得的共晶体 ($A_{\text{B}} + \text{Fe}_3\text{C}$) 称为莱氏体，用符号 L_{d} 表示。

d. E 点——碳在 $\gamma-\text{Fe}$ 中的最大溶解度点 ($w_{\text{C}} = 2.11\%$)。E 点又是钢和生铁的分界点，即 $w_{\text{C}} < 2.11\%$ 的铁碳合金称为钢， $w_{\text{C}} > 2.11\%$ 的铁碳合金称为生铁。

e. P 点——碳在 $\alpha-\text{Fe}$ 中的最大溶解点 ($w_{\text{C}} = 0.0218\%$)。

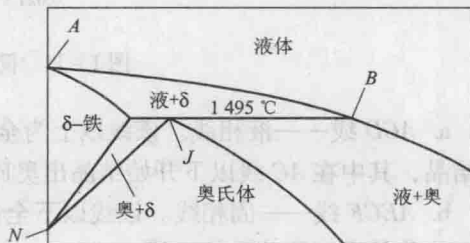


图 1-10 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 状态图包晶部分

f. G 点——纯铁的同素异晶转变点 (912 °C)。

g. S 点——共析点 ($w_C = 0.77\%$)。此点上的奥氏体在恒温下同时析出铁素体和渗碳体的混合物。这种由一定成分的固相,在一定温度下,同时析出成分不同的两种固相的转变,称为共析转变。其表达式为 $A_s \rightarrow F_p + Fe_3C$, 此共析转变后所获得的产物 ($F_p + Fe_3C$) 称为珠光体,用符号 P 表示。

② 简化后的 Fe-Fe₃C 相图如图 1-11 所示。图中主要特性线及其意义如下:

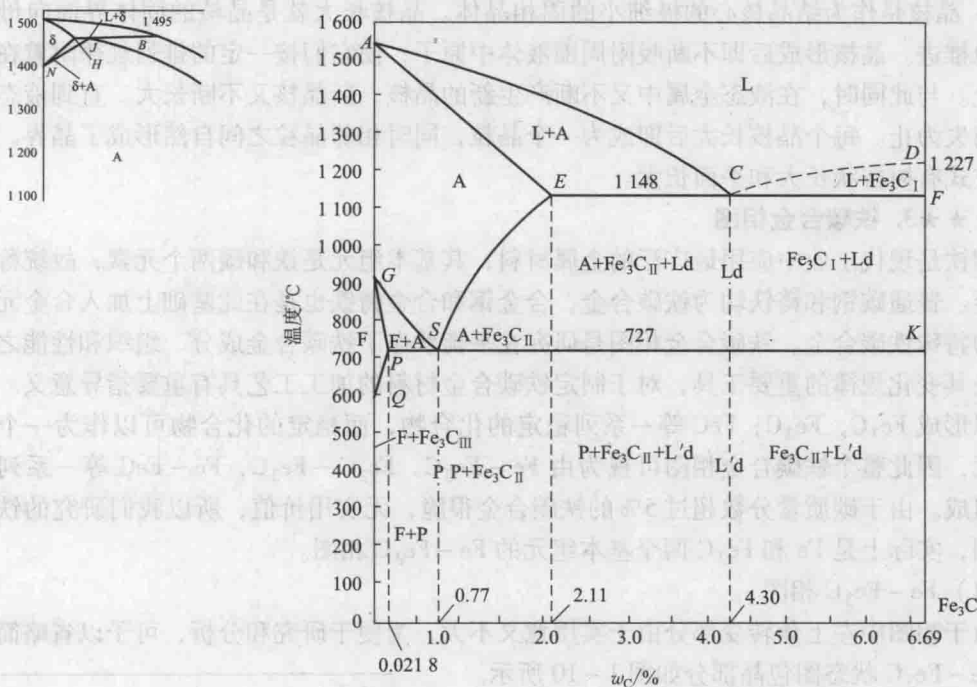


图 1-11 简化后的 Fe-Fe₃C 相图

a. ACD 线——液相线。该线以上为全部液相:当铁碳合金冷却到该线所对应温度时开始结晶,其中在 AC 线以下开始结晶出奥氏体;在 CD 线以下开始结晶出渗碳体。

b. AECF 线——固相线。该线以下全部为固态,其中 AE 线表示奥氏体结晶终了;ECF 线又称共晶线,即共晶转变线。

c. PSK 线——共析线,又称 A_1 线即共析转变线。

d. GS 线——又称 A_3 线,是奥氏体与铁素体的相互转变线。

e. ES 线——又称 A_{cm} 线,是碳在奥氏体中的溶解度曲线,随着温度的降低从奥氏体中沿晶界析出渗碳体,称为二次渗碳体 (Fe_3C_{II})。

f. PQ 线——碳在铁素体中的溶解度曲线,随温度的降低,从铁素体中沿晶界析出渗碳

体,称为三次渗碳体($\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$)。

g. GP 线——奥氏体转变为铁素体的终了线。

③ 典型铁碳合金的结晶过程及组织 (钢的典型合金结晶过程部分示意图如图 1-12 所示)。

$\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图中不同成分的铁碳合金,在室温下将得到不同的显微组织,其性能也不同。通常根据相图中的 P 点和 E 点将铁碳合金分为工业纯铁、钢及白口铸铁三类。为进一步了解铁碳合金组织的形成规律,现以典型的铁碳合金共析钢为例分析其结晶过程和室温下的平衡组织。

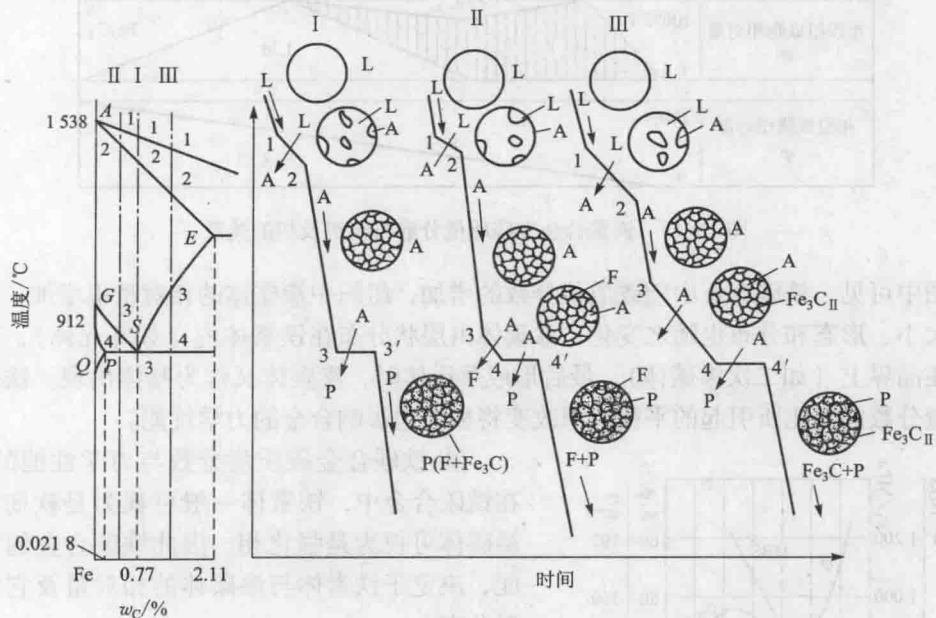


图 1-12 钢的典型合金结晶过程部分示意图

(2) 共析钢

共析钢的冷却过程如图 I 线所示。当合金由液态缓冷到液相线 1 点温度时,从液相中开始结晶出奥氏体。随着温度的降低,奥氏体的量不断增加,冷却到 2 点温度时,液相全部结晶为奥氏体。从 2 点至 3 点液相全部结晶成与原合金成分相同的奥氏体,冷却至 3 点温度 ($727\text{ }^{\circ}\text{C}$) 时,奥氏体发生共析转变,形成珠光体。

当温度继续下降时,珠光体中铁素体的碳质量分数减少,其成分随固溶线 PQ 线变化,析出极少量的三次渗碳体。但三次渗碳体在珠光体中难以分辨,一般忽略不计。共析钢室温下的平衡组织为珠光体。珠光体一般呈层状。

(3) 铁碳合金的成分、组织、性能间的关系