

普通高等教育规划教材

机械制造基础

JIXIE ZHIZAO JICHU

李长河◎主编



配电子教案



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育规划教材

机械制造基础

主 编 李长河
副主编 王宏立 赵秀荣
参 编 杨建军 郭建烨 苏子林
主 审 卢秉恒



机械工业出版社

本教材是按照高等学校机械学科本科专业规范、培养方案和课程教学大纲的要求,结合有关学校教学改革、课程改革的经验而编写的普通高等教育规划教材。全书主要内容包括金属材料概述、铸造、压力加工、焊接、切削加工以及先进制造技术等内容。每章后面附有复习思考题。

本书十分重视学生获取知识、分析问题及解决工程技术问题能力的培养,特别注重学生知识素质与创新能力的提高。为此在本教材的编写内容上既理论密切联系生产实际,又介绍了机械制造的新技术、新工艺。

本书可作为高等学校机械类、近机类各专业的教材,也可作为高职类工科院校及机械工程技术人员的学习参考书。

本书配有电子教案,凡一次性购书 30 本以上者免费赠送一份电子教案。请与本书责任编辑余茂祚联系(联系电话 010-88379759,邮箱 yumaозuo@163.com)

图书在版编目(CIP)数据

机械制造基础/李长河主编. —北京:机械工业出版社,
2009.7

普通高等教育规划教材
ISBN 978-7-111-27645-6

I. 机… II. 李… III. 机械制造-高等学校-教材
IV. TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 117014 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:余茂祚 责任编辑:余茂祚 版式设计:霍永明
责任校对:张莉娟 封面设计:马精明 责任印制:乔宇
北京京丰印刷厂印刷
2009 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷
184mm×260mm·17.25 印张·426 千字
0 001—4 000 册
标准书号:ISBN 978-7-111-27645-6
定价:29.00 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) 68354423
封面无防伪标均为盗版

前 言

“机械制造基础”是高等工科院校机械类、近机类各专业的一门重要的技术基础课程，是联系基础课、实践教学和专业课之间的纽带。

本教材是根据全国高等学校“机械制造基础”课程教学大纲要求，按照近几年来全国高等学校教学改革的有关精神，在结合编者多年教学实践并参照了国内外有关资料和书籍的基础上编写而成的。全书突出体现了以下特点：

(1) 紧密结合教学大纲，在内容上注重于加强基础、突出能力的培养，做到系统性强、内容少而精。

(2) 教材体现了机械制造理论与实践相结合，以金属材料的结构、性能、选用，以及零件（毛坯）主要成形方法的基本原理和工艺特点为主线，全面讲述了金属材料、热处理、毛坯成形、切削加工原理及机床、刀具、夹具等内容。既有传统机械制造的基础知识，又有新技术、新工艺在机械制造领域的应用和发展，特色明显。

(3) 为适应机械制造学科的进步和发展形势需要，各章内容贯穿了制造系统的思想，同时考虑到扩大知识面，适当加入了先进制造技术等反映国内外的新成果、新技术的内容。

(4) 全书采用最新国家标准及法定计量单位。

(5) 为方便学生自学和进一步理解课程的主要内容，在各章后均编入了一定数量的复习思考题，做到理论联系实际，学以致用。

本书由李长河任主编，王宏立、赵秀荣任副主编。第1章由赵秀荣编写，第2章由苏子林编写，第3章由杨建军编写，第4章由郭建烨编写，第5章第1、3、4节由王宏立编写，第2节由李长河编写，第6章由李长河编写。全书由李长河统稿和定稿。

本书承蒙中国工程院院士、西安交通大学卢秉恒教授主审，并提出了许多宝贵的建议，在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中得到了许多专家、同仁的大力支持和帮助，参考了许多教授、专家的有关文献，在此，一并向他们表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，书中难免存在疏漏和不当之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言		3.5 特种压力加工	107
第1章 金属材料概述	1	复习思考题	111
1.1 金属材料的性能	1	第4章 焊接	112
1.2 金属和合金的晶体结构与 结晶	3	4.1 熔焊	113
1.3 铁碳合金	9	4.2 压焊与钎焊	126
1.4 常用金属材料	13	4.3 常用金属材料的焊接	128
1.5 粉末冶金材料	31	4.4 焊接结构设计	135
1.6 钢的热处理	34	复习思考题	144
1.7 机械零件的失效与材料的 选择	39	第5章 切削加工	147
复习思考题	46	5.1 切削加工基础知识	147
第2章 铸造	48	5.2 典型表面加工分析	180
2.1 铸造工艺基础	48	5.3 切削加工工艺基础	190
2.2 合金铸件的生产工艺	57	5.4 零件结构工艺性	227
2.3 砂型铸造	62	复习思考题	239
2.4 特种铸造	68	第6章 先进制造技术	242
2.5 铸件结构设计	73	6.1 超高速加工技术	242
复习思考题	76	6.2 超精密加工技术	251
第3章 压力加工	77	6.3 特种加工技术	253
3.1 金属的塑性变形	77	6.4 快速成形技术	260
3.2 自由锻	84	6.5 非金属材料的成形技术	263
3.3 模锻	90	6.6 先进制造技术发展趋势	267
3.4 板料冲压	99	复习思考题	270
		参考文献	271

第1章 金属材料概述

金属材料是由金属元素或以金属元素为主构成的、具有金属特性的材料的统称，包括纯金属、合金、金属间化合物和特种金属材料等。

人类文明的发展和社会的进步同金属材料关系十分密切。继石器时代之后出现的铜器时代、铁器时代，均以金属材料的应用为其时代的显著标志；现代，种类繁多的金属材料已成为人类社会发展的物质基础。

金属材料通常分为钢铁材料、非铁合金材料和特种金属材料。①钢铁材料，包括工业纯铁，铸铁，碳钢，以及各种用途的结构钢、不锈钢、耐热钢、高温合金、精密合金等。广义的钢铁材料还包括铬、锰及其合金。②非铁合金材料是指除铁、铬、锰以外的所有金属及其合金，通常分为轻金属、重金属、贵金属、半金属、稀有金属和稀土金属等。非铁合金材料的强度和硬度一般比纯金属高，并且电阻大、热导率低。③特种金属材料包括不同用途的结构金属材料、功能金属材料。其中有通过快速凝固工艺获得的非晶态金属材料，以及准晶、微晶、纳米晶金属材料等；还有隐身、抗氢、超导、形状记忆、耐磨、减振阻尼等特殊功能合金，以及金属基复合材料等。

金属材料按生产成形工艺又分为铸造金属、变形金属、喷射成形金属，以及粉末冶金材料。①铸造金属通过铸造工艺成形，主要有铸钢、铸铁和铸造非铁合金材料。②变形金属通过压力加工如锻造、轧制、冲压等成形，其化学成分与相应的铸造金属略有不同。③喷射成形金属是通过喷射成形工艺制成具有一定形状和组织性能的零件或毛坯。

1.1 金属材料的性能

金属材料的性能分为物理与化学性能、使用性能和工艺性能。材料在使用过程中适应或抵抗各种外界作用如机械力、化学作用、辐射、温度、电磁场等的能力叫做使用性能。使用性能包括物理性能、化学性能和力学性能。材料适应实际生产工艺要求的能力叫做工艺性能，也称“加工性能”。

1.1.1 金属的力学性能

金属的力学性能是指金属在力作用下所显示与弹性和非弹性反应相关或涉及应力—应变关系的性能，表现为金属的变形和断裂。因此，金属的力学性能可以理解为金属材料抵抗外加载荷引起的变形和断裂的能力。金属的力学性能包括弹性、刚度、塑性、强度、硬度、韧性等。这是设计零件时选用金属材料的主要依据。

1. 弹性 物体在外力作用下改变其形状和尺寸，当外力卸除后物体又回复到其原始形状和尺寸，这种特性称为弹性。其大小用弹性极限 σ_e 表示，单位为 MPa。弹性极限是金属材料不产生变形时所能承受的最大应力。对于在工作中不允许产生任何塑性变形的零件，设计时，弹性极限就成为该类零件选材的重要依据，如弹簧须选用弹性极限高的材料。

2. 刚度 大多数机械零件在工作过程中是处于弹性状态，为防止发生弹性变形失效，不允许零件有过多的弹性变形。零件抵抗弹性变形的能力，称为刚度。工程上常用弹性模量

E 作为衡量材料刚度的指标。 E 越大,刚度越好。当材料选定(即 E 一定)后,提高零件刚度的方法只有增加零件的横截面积了。

3. 塑性 断裂前材料发生不可逆永久变形的能力,称为塑性,常用指标是断后伸长率 δ (%)和断面收缩率 ψ (%)。 δ 和 ψ 越大,材料塑性越好。塑性好的金属材料容易进行锻压、焊接,能够采用冷变形,如冷冲压等;好的塑性也可避免机器零件在使用中万一超载而产生的突然断裂。

4. 强度 金属抵抗永久变形和断裂的能力,包括抗拉强度 σ_b 、屈服点(屈服强度) σ_s 、抗压强度 σ_{bc} 、抗弯强度 σ_{bb} 、抗剪强度 τ_b ,单位均为 MPa。其中抗拉强度和屈服点是选材的重要依据。机械设计时,必须保证零(构)件的最大工作应力不得超过材料的抗拉强度,以免断裂。在发动机的缸盖螺栓选材时,为保证气缸体与缸盖间的气密性,螺栓不允许产生塑性变形,所选材料的屈服点应不小于其最大的工作应力。

5. 硬度 材料抵抗局部变形,特别是塑性变形压痕或划痕的能力。这是衡量金属软硬程度的判据。在一般情况下,金属材料的硬度越高,耐磨性能越好,而且硬度与强度之间有一定的关系,根据硬度的大小可以大致估算材料的抗拉强度。因此,硬度是金属材料最重要的性能之一。

金属材料的硬度指标是在硬度机上测定的,生产中硬度测定方法有压入硬度试验法(如布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度)、划痕硬度试验法(如莫氏硬度)、回跳硬度法(肖氏硬度)等。其中布氏硬度(HBW)、洛氏硬度(HR)、维氏硬度(HV)最常用。

6. 冲击吸收功 许多机械零件,如活塞销、连杆、锤杆、冲模等,在工作中往往要承受冲击载荷的作用,因此在选材时,还必须考虑材料抵抗冲击载荷的能力。冲击试样缺口底部单位横截面积上的冲击吸收功,称为冲击吸收功,目前是以大能量一次冲击值 a_{KU} 、 a_{KV} 作为指标。

冲击吸收功是相对指标,其值越大,材料的韧度越好,许多国家直接用冲击吸收功 A_K 作为冲击吸收功指标,我国也将逐步用 A_K 取代。

工程上承受冲击载荷的机械零件,很少是因一次大能量冲击而遭破坏的,绝大多数是经千百万次小能量多次重复冲击破坏的。因此,用来表示材料的冲击抗力是不符合实际的,一般只作为选材的参考,而不适用于强度计算。

7. 疲劳强度 金属材料在无数次重复交变载荷作用下不发生断裂的最大应力,称为疲劳强度。对称弯曲应力的疲劳强度以 σ_{-1} 表示。

实际上不可能进行无数次试验,故工程上采用的疲劳强度是指材料在一定的应力循环次数下不发生断裂的最大应力。对钢材而言,如应力循环次数达 10^7 次仍不发生疲劳断裂,就认为不会再发生疲劳断裂。非铁合金材料和某些超高强度钢的应力循环基数则常取 10^8 次。

为了提高零件的疲劳强度,一方面在设计零件时应使零件具有合理的结构形状,避免产生应力集中;另一方面要设法提高零件表面的加工质量或采用表面强化的方法,如表面淬火、化学热处理、喷丸处理和滚压等,以减小产生微裂纹的倾向。

1.1.2 金属的物理性能和化学性能

在机械制造中,绝大多数机械零件都是以力学性能作为设计计算和选材的主要依据,但有些机械设备除要求应具备一定的力学性能外,还要求具备某些特殊的物理性能或化学性能。例如,飞机零件要选用密度小的铝合金;导电元器件则要采用导电性好的铜或铜合金;

内燃机的排气门应选用耐热性好的材料；某些化工设备零件则要求耐腐蚀性好的材料等。

金属材料的主要物理性能有密度、熔点，热胀系数，导热性和导电性等；化学性能是金属材料在常温或高温时抵抗各种化学介质作用的能力，如耐蚀性和耐热性等。

金属材料的物理性能、化学性能对热加工工艺也有一定的影响。例如，高速钢的导热性较差，锻造和热处理时都必须用较低的加热速度，否则会产生裂纹；又如铸钢和铸铁因熔点的不同，其熔炼和浇注工艺也不同。

1.1.3 金属材料的工艺性能

金属材料的工艺性能是保证易于高速地、经济地获得优质制件的必要条件，它是金属的物理、化学和力学性能的综合。按工艺方法的不同可分为铸造性、锻造性、冲压性、弯曲性、焊接性、切削加工性等。

1.2 金属和合金的晶体结构与结晶

金属材料包括纯金属和合金，在一般情况下，纯金属和合金都是晶体。纯金属虽具有良好的导电性、导热性、塑性等优点，但因提纯困难，价格昂贵，力学性能较低，满足不了工程技术上高强度、高硬度、耐磨性、耐热性和耐腐蚀性等各种性能的要求，因而工程上使用的大多是合金。

纯金属和合金通过结晶得到的晶体结构决定了金属材料的性能。

1.2.1 纯金属的晶体结构与结晶

1. 晶格与晶格常数 纯金属的性能不仅取决于原子的本性和原子间结合键的类型，同时也取决于原子规则排列的方式。为了分析晶体内部原子排列的规律，人们将构成晶体的实际质点忽略，而将它们抽象成纯粹的几何点，称之为阵点。这些阵点在三维空间呈周期性规则排列，并且有等同的周围环境的模型称为晶体点阵，也称为晶格，如图 1-1 所示。

在晶体点阵中取一单位体积（通常为六面体）作为点阵的最小组成单元，称为晶胞，如图 1-2 所示。晶胞的大小和形状以晶胞的棱边长 a 、 b 、 c 和棱边之间的夹角 α 、 β 、 γ 来表示。其中，棱边的边长 a 、 b 、 c 称为晶格常数。

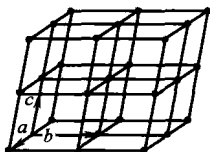


图 1-1 晶体点阵示意图

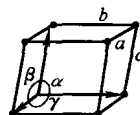


图 1-2 晶胞示意图

2. 晶格类型 最常见的金属晶体结构有三种，即体心立方晶格（见图 1-3a）、面心立方晶格（见图 1-3b）、密排六方晶格（见图 1-3c）。

属于体心立方晶格的金属有铬、钨、钼、钒及 αFe （温度在 912°C 以下的纯铁）等；属于面心立方晶格的金属有铝、铜、镍及 γFe （温度在 $1394 \sim 912^\circ\text{C}$ 的纯铁）等；属于密排六方晶格的金属有镁、锌、铍、铬等。

3. 实际金属结构 实际的金属结构都包含着许多小晶体，每个小晶体内的晶格方位是一致的，而小晶体之间彼此方位不同。由于每个小晶体都具有不规则的颗粒外形，故称为晶粒；晶粒之间的界面叫做晶界。由于晶界是两相邻晶粒不同晶格方位的过渡区，所以在晶界

上原子排列总是不规则的。这种由多晶粒组成的晶体结构称为多晶体。钢铁材料的晶粒尺寸一般为 $10^{-1} \sim 10^{-3} \text{mm}$ ，所以必须在显微镜下才能观察到，因此也叫显微组织。非铁合金材料到晶粒一般都比较粗大，有时肉眼可以看见。

在实际晶体中，或多或少存在偏离理想结构的区域，称为晶体缺陷。晶体缺陷对金属的许多性能有极重要的影响，与晶体的凝固、固态相变、扩散的过程都有重大关系，特别是对塑性变形、强度和断裂等方面起着决定性的作用。

在晶体中，缺陷并不是静止地、稳定不变地存在着，而是随着各种条件的改变而不断地变动，它们可以产生、发展、运动和交互作用，有时则会合并或消失。

晶体缺陷按几何形状可分为点缺陷（晶格空位、间隙原子和置换原子，见图 1-4）、线缺陷（晶体中呈连续现状分部的位错，图 1-5 所示为刃形位错）和面缺陷（晶界、亚晶界，见图 1-6）三类。

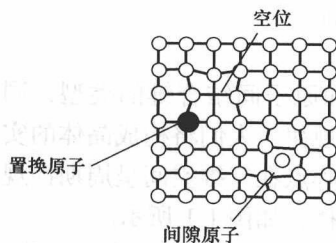


图 1-4 点缺陷示意图

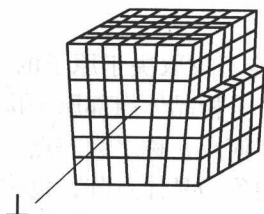


图 1-5 刃形位错结构示意图

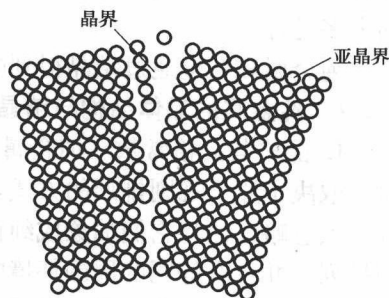


图 1-6 晶界、亚晶界示意图

所有这些缺陷都将导致周围的晶格发生晶格明显的畸变，从而对金属的力学性能、化学性能产生明显的影响。

1.2.2 纯金属的结晶

1. 金属结晶过程 金属溶液在凝固后一般都以晶态存在，即内部原子由不规则的排列转变到规则排列。形成晶体的过程，称为结晶。结晶形成的组织，直接影响金属内部的组织与性能。

金属在结晶过程中，其结晶温度可以用热分析法测定。将液态金属放在炉中缓慢冷却，在冷却过程中测得温度随时间变化的数据，则得到如图 1-7 所示的冷却曲线 1。由于结晶时放出潜热，补偿了冷却散失的热量，所以冷却曲线出现水平台阶，即结晶在恒温下进行。在无限缓慢冷却条件

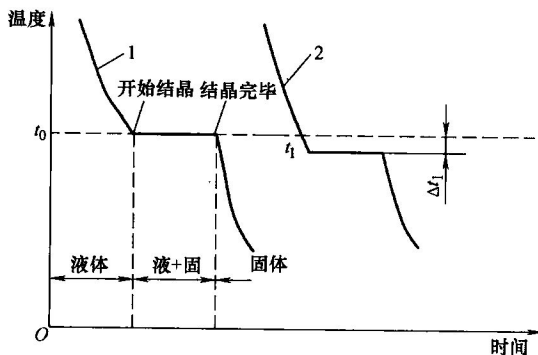


图 1-7 纯金属结晶时的冷却曲线

下的平衡结晶温度 T_0 ，称为理论结晶温度。

在实际结晶时，冷却速度不可能无限缓慢，因此实际结晶温度 t_1 总是低于理论结晶温度 t_0 ，如图 1-7 中曲线 2 所示。理论结晶温度与实际结晶温度之差称为过冷度，即 $t_0 - t_1 = \Delta t$ 。金属结晶的过冷度与冷却速度有关，冷却速度越快，过冷度就越大。

金属的结晶过程是不断形成晶核和晶核不断长大的过程，即由晶核的产生和长大两个基本过程组成的，如图 1-8 所示。晶核是以树枝状的方式长大，所以正在长大的晶体叫枝晶。

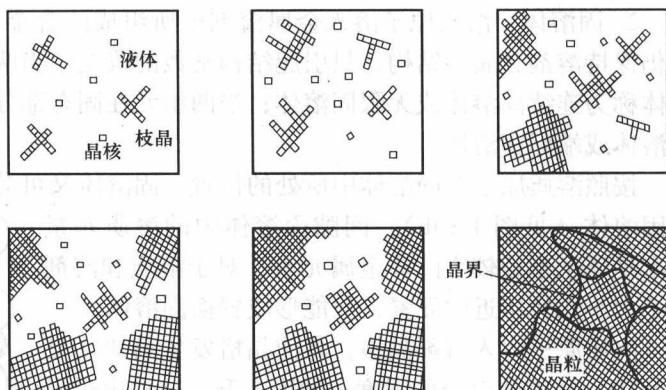


图 1-8 纯金属结晶过程示意图

2. 铸态晶粒的大小 金属结晶后的晶粒越细小，晶界的面积就越大。晶界面积越大，晶体缺陷就越多，则对金属力学性能影响越大。一般情况下，细晶粒组织的强度、硬度、塑性和韧性都比粗晶粒组织好。获得细晶粒的方法通常是增加过冷度、变质处理、附加振动及电磁搅拌等。

3. 金属的同素异构转变 某些金属在不同温度和应力下呈不同的晶体结构，同一种固态的纯金属（或其他单相物质），在加热或冷却时发生由一种稳定状态转变成另一种晶体结构不同的稳定状态的现象，称为同素异构转变。此时除体积变化和热效应外还会发生其他性质改变。例如，Fe、Co、Sn、Mn 等元素都具有同素异构特性。

铁在结晶后继续冷却至室温的过程中，将发生两次晶格转变，其转变过程如图 1-9 所示。铁在 1394℃ 以上时具有体心立方晶格，称为 δFe ；冷却至 1394 ~ 912℃ 之间，转变为面心立方晶格，称为 γFe ；继续冷却至 912℃ 以下，又转变为体心立方晶格，称为 αFe 。

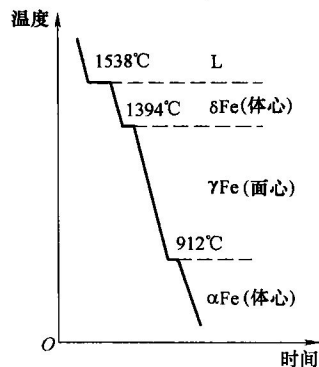


图 1-9 纯铁的同素异构转变

金属的同素异构转变与液态金属的结晶过程类似。转变时遵循结晶的一般规律，如具有一定的转变温度，转变过程包括形核、长大两个阶段等。因此，同素异构转变也可以看作是一种结晶，有时也称为重结晶。通过同素异构转变可以使晶粒得到细化。

1.2.3 二元合金的晶体结构与结晶

1. 二元合金的晶体结构 合金是由两种或两种以上的化学元素（其中至少有一种是金属元素）通过熔炼、烧结或其他方法组合而成的具有金属特性的物质。组成合金的元素叫做组元，组元一般指化学元素，但稳定化合物也可看成是一个组元。由两种组元组成的合金称为二元合金，由三种组元组成的合金称为三元合金。以此类推，由多种组元组成的合金称为多元合金。

液体中，绝大多数合金的组元能相互溶解成为均匀的液体。合金的结晶与纯金属一样，也是通过形核及长大来完成的。不同的是，由于合金组元间的相互作用，使生成的

结晶产物往往不只一种组元的晶粒。在物质中，凡是成分相同、结构相同并与其他部分以界面分开的均匀组成部分称为相。合金结晶后可以是一种相，也可以是由若干相所组成。

2. 固溶体 溶质原子溶入金属溶剂中所组成的合金相，称为固溶体。固溶体的点阵结构仍保持溶剂金属的结构，只引起结构常数的改变。当两组元在固态无限溶解时所形成的固溶体称为连续固溶体或无限固溶体；当两组元在固态部分溶解时所形成的固溶体，称为有限固溶体或端际固溶体。

按照溶质原子在固溶体中所处的位置，固溶体又可分为间隙固溶体（见图 1-10a）和置换固溶体（见图 1-10b）。间隙固溶体中的溶质元素多半是原子半径较小的非金属元素；对于溶质和溶剂原子大小比较接近的元素，只能形成置换固溶体。

溶质原子溶入溶剂晶格，将使晶格发生畸变（见图 1-10）从而使合金的强度、硬度上升。这种由于形成固溶体而引起强度提高的现象称为固溶强化。固溶强化是强化合金的基本途径之一。

3. 金属化合物 在合金中，当溶质含量超过固溶体的溶解度时将析出新相。若新相的晶格结构与合金的另一组元相同，则新相为以另一组元为溶剂的固溶体；若新相的晶格不同于任一组元，则新相是组元间形成的一种新物质——金属化合物。例如，铁碳合金中，碳的含量超过铁的溶解能力时，多余的碳与铁相互作用会形成金属化合物 Fe_3C 。其晶体结构如图 1-11a 所示；钒碳合金中，钒与碳相互作用形成碳化钒。其晶体结构如图 1-11b 所示。金属化合物一般具有复杂的晶格，熔点高，硬而脆。

在一个合金系中，固溶体和金属化合物都是合金的基本相。合金中的化合物分布在固溶体相的基体上，将使合金的强度、硬度明显提高，但塑性和韧性有所下降。以金属化合物作为强化相强化金属材料的方法，称为第二相强化，第二相强化也是材料强化的基本途径之一。

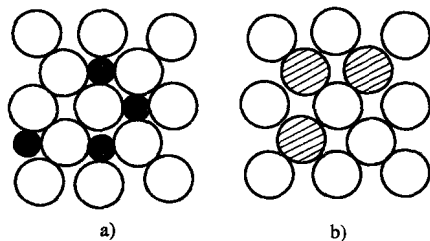


图 1-10 固溶体及其晶格畸变

a) 间隙固溶体 b) 置换固溶体

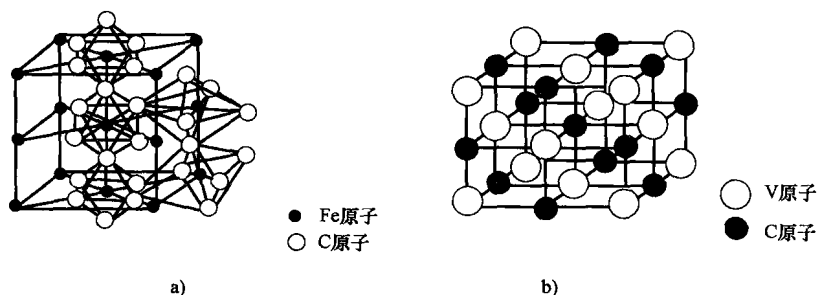


图 1-11 金属化合物的晶体结构

a) Fe_3C 的结构 b) VC 的结构

1.2.4 二元合金的结晶

二元及二元以上的合金，其结晶较纯金属复杂，常常借助相图来分析和研究其结晶过程。

相图，又称状态图或平衡图，是在平衡条件下，即在无限缓慢加热或冷却条件下制订的

一种表明某物质系统中各相稳定存在的成分、温度、压力范围，相变条件以及相变趋势的简明图解。它是合金系（由相同组元组成的不同成分的一系列合金）中各种合金的结晶过程的简明示意图。每个合金系都有它自己确定的相图。到目前为之，几乎所有的合金相图都是通过试验建立起来的。建立相图最常用的试验方法是热分析法。

1. 二元匀晶相图 图 1-12 所示是 Cu-Ni 合金相图，它是典型的匀晶相图。形成这种相图的条件是组成合金的两组元在液态和固态均能以任何比例互溶，形成无限固溶体。

相图中各点、线、区的物理意义是， a 、 b 分别为 Cu、Ni 的熔点。 acb 线为液相线，在该

线温度以上的合金均为液相 L 。任何成分的合金从液态冷却至液相线便开始结晶出固相 α 。 adb 线为固相线，任何成分合金冷却至此线，则全部转变成固相 α ；反之亦然。液相线与固相线之间的区域是液相和固相共存的两相区 $L + \alpha$ 。两相区的存在，说明合金结晶过程是在一个温度范围内完成的，这一点与纯金属不一样，纯金属是在恒温下结晶，在相图上只是一个临界点。

现以成分为 $w_{Ni} = 75\%$ 的合金为例讨论匀晶相图合金的结晶过程。

当金属液从高温冷却到液相线的温度 t_1 时，液相中开始结晶出 α 固溶体，放出结晶潜热，降低了冷却速度，冷却曲线出现转折点。随着温度继续下降， α 固溶体量逐渐增加，冷至固相线温度 t_2 时，合金全部结晶成固体 α 。此后，因不再放出结晶潜热，冷却曲线上又出现转折点，从此一直冷至室温，不再发生相变。

液态合金进入两相区后，当冷却十分缓慢，原子能够进行充分扩散时，则固相能够在任何时刻保持均一浓度，而最后全部固相达到合金成分。但在实际生产中，由于合金在凝固过程中冷却速度较快，且固相内原子扩散困难，因而先结晶出的枝晶主轴和后结晶的枝晶，存在明显的成分差异并保留下来。这种在一个晶粒内化学成分不均匀的现象，称为枝晶偏析或晶内偏析。枝晶偏析的存在使合金的力学性能降低，常采用扩散退火的方法去消除。

2. 二元共晶相图 两组元合金，液态时无限互溶；固态时只能有限互溶。结晶时发生共晶转变所形成的相图为共晶相图。

图 1-13 所示是共晶相图的一例。图中， A 为 Pb 的熔点， B 为 Sn 的熔点； AEB 为液相线， $AMENB$ 为固相线； MF 线为 Sn 在 Pb 中的溶解度曲线或 α 相的固溶线； NG 线为 Pb 在 Sn 中的溶解度曲

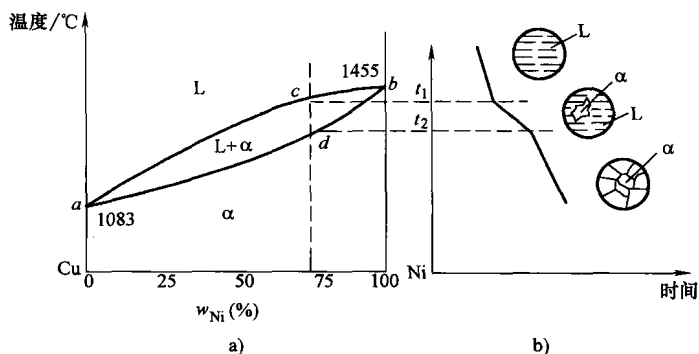


图 1-12 Cu-Ni 合金相图及结晶过程示意图

a) Cu-Ni 合金相图 b) 冷却曲线

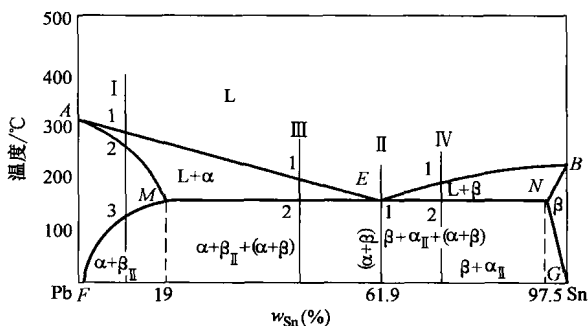
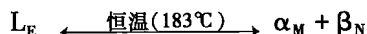


图 1-13 Pb-Sn 合金相图

线或 β 相的固溶线； E 点为共晶点， MEN 线（水平恒温线）为共晶线。

图中的相区：Pb-Sn 合金系有三个基本相。液相线以上为液相区，合金为均匀液相 L ；固相线以下有两个单相，即 Sn 溶于 Pb 中的固溶体 α 相区和 Pb 溶于 Sn 中的固溶体 β 相区。在各单相区之间存在三个两相区，即 $L+\alpha$ 、 $L+\beta$ 、 $\alpha+\beta$ 相区。有一条三相共存线（ MEN 线）。

成分为 E 点（共晶成分）的合金，在缓冷到 MEN 水平线温度（共晶温度）时，将发生转变，同时结晶出成分为 M 点的 α 固溶体和成分为 N 点的 β 固溶体，转变式为



这种由一定成分的液相在某恒温下，同时结晶出两种成分与结构均不同的固相的转变，称为共晶转变或叫共晶反应。其产物是由两个固相组成的机械混合物，称为共晶组织。凡成分在 M 、 N 点之间的所有液态合金，冷却到共晶温度时，均有共晶反应。把成分位于 E 点的合金称为共晶合金；位于 E 点以左 M 点以右的合金称为亚共晶合金；位于 E 点以右 N 点以左的合金称为过共晶合金。 M 点以左和 N 点以右的合金为固溶体合金。

合金 I（固溶体合金）、合金 II（共晶合金）、合金 III（亚共晶合金）、合金 IV（过共晶合金）的结晶过程如图 1-14 ~ 图 1-17 所示，室温组织分别为 $\alpha + \beta_{II}$ 、 $(\alpha + \beta)$ 、 $\alpha + \beta_{II} + (\alpha + \beta)$ 、 $\beta + \alpha_{II} + (\alpha + \beta)$ 。

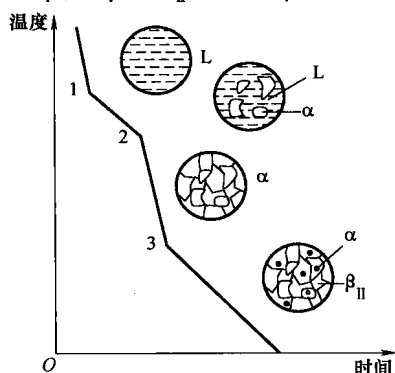


图 1-14 合金 I 的结晶过程

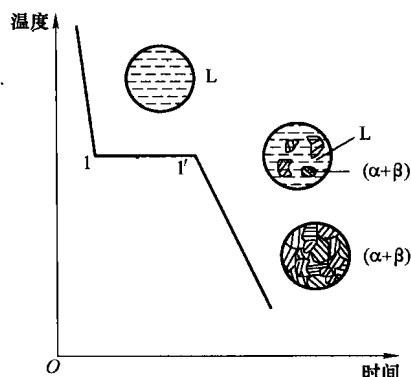


图 1-15 合金 II 的结晶过程

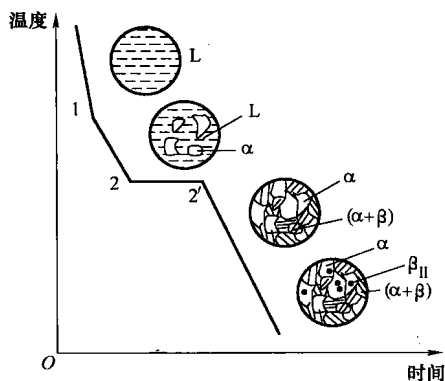


图 1-16 合金 III 的结晶过程

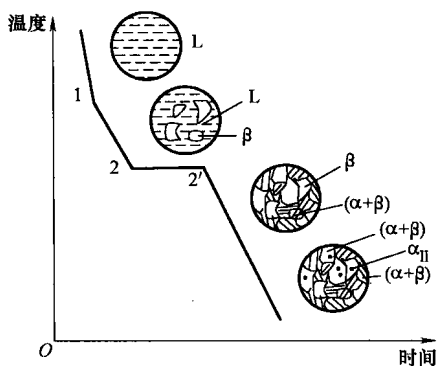


图 1-17 合金 IV 的结晶过程

为了便于直观表达合金成分、组成相与组织，常将合金组织直接填写在相同的相应区域内如图 1-18 所示。

二元相图除匀晶相图、共晶相图外，还有包晶相图、共析相图和形成稳定化合物的相图等。相图与合金的使用性能的关系如图 1-19 所示。

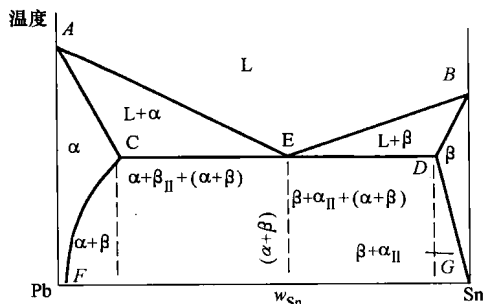


图 1-18 标注组织的共晶相图

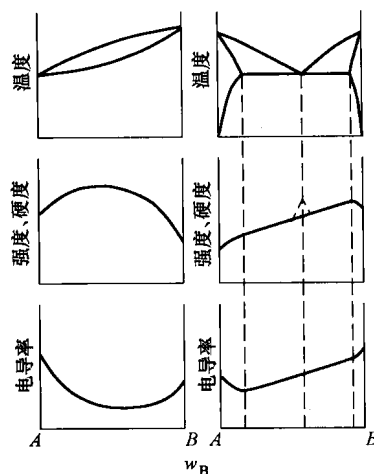


图 1-19 相图与合金的使用性能的关系

一般情况下，形成两相混合物的合金，其力学性能和物理性能大致是两组成相性能的算术平均值，与合金成分呈线性关系。组织为单相固溶体的合金，因固溶强化，其性能与合金成分略呈抛物线关系。当形成化合物时，则在性能—成分曲线上的化合物成分处出现极值。合金的晶格畸变大，强度、硬度越高，电阻越大。

相图与合金的铸造性能的关系如图 1-20 所示。

纯组元和共晶成分附近的合金特别是共晶合金，在相图中液、固线间距较小，结晶温度范围窄，结晶温度低，合金流动性最好，缩孔集中，铸造性能好。若液、固线间距越大，合金的结晶温度范围大，先结晶出的树枝晶阻碍液态合金流动，降低了合金的流动性，缩孔分散，铸造性能差。所以，铸造金属成分常选在共晶或接近共晶成分。

单相合金的塑性较好，变形抗力小，变形均匀，不易开裂，因而压力加工性能好；两相组织的合金，因组织中两个相塑性不同，变形能力较差，所以压力加工性能较差，特别是组织中有较多的化合物相时更是如此，甚至无法进行塑性变形加工（如铸铁）。

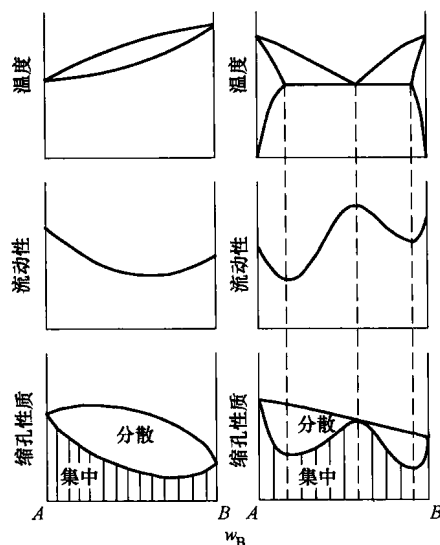


图 1-20 相图与合金的铸造性能的关系

1.3 铁碳合金

铁碳合金是以铁和碳为组元的二元合金，是机械制造中应用最广泛的金属材料。

铁碳合金中铁和碳的结合方式为固溶体、化合物、固溶体和化合物形成的机械混合物。铁碳合金的基本组织见表 1-1。

表 1-1 铁碳合金基本组织

组织名称	符号	组织特点	碳的最大溶解度 (%)	力学性质
铁素体 Ferrite	F	碳溶解于体心立方晶格 αFe 中所形成的固溶体	0.0218	塑性和韧性较好 $\delta = 30\% \sim 50\%$, $\sigma_b = 180 \sim 280\text{MPa}$, 硬度 $50 \sim 80\text{HBW}$
奥氏体 Austenite	A	碳溶解于面心立方晶格 γFe 中所形成的固溶体	2.11	质软、塑性好 $\delta = 40\% \sim 50\%$, $\sigma_b = 400\text{MPa}$, 硬度 $170 \sim 220\text{HBW}$
渗碳体 Cementite	Fe_3C	具有复杂斜方结构的铁与碳的间隙化合物	$w_c = 6.69\%$	塑性、韧性几乎为零; 脆、硬, 硬度 800HBW
珠光体 Pearlite	P	$w_c = 0.77\%$ 的奥氏体同时析出 F 与 Fe_3C 的机械混合物 (共析反应)		$\delta = 20\% \sim 25\%$, $\sigma_b = 750 \sim 900\text{MPa}$, 硬度 $180 \sim 280\text{HBW}$
莱氏体 Ledeburite	Ld Ld'	$w_c = 4.3\%$ 的金属液体同时结晶出 A 与 Fe_3C 的机械混合物 (共晶反应), 该混合物在低温时共析出 P 与 Fe_3C 的机械混合物		硬度高, 塑性很差, 硬度 560HBW

1. 铁碳相图 铁碳相图实际上是 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图。表示处于平衡状态下的不同成分的铁碳合金, 在不同温度下的状态与组织的关系图。铁碳相图是研究碳素钢和铸铁的相变过程, 以及制订铸造、热加工和热处理等工艺的重要依据。

图 1-21 所示为简化的铁碳相图。由于当 $w_c = 6.69\%$ 时, 铁与碳全部形成硬而脆的 Fe_3C , 所以实际使用的铁碳合金一般 $w_c \leq 5\%$ 。因此铁碳相图只研究 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 。

铁碳相图中的各特征点、线见表 1-2。

2. 铁碳合金的平衡结晶过程与组织转变 铁碳合金成分不同, 得到室温下不同的组织。根据铁碳合金的碳的质量分数及组织的不同, 可将铁碳合金分为工业纯铁、钢和白口铸铁三大类。

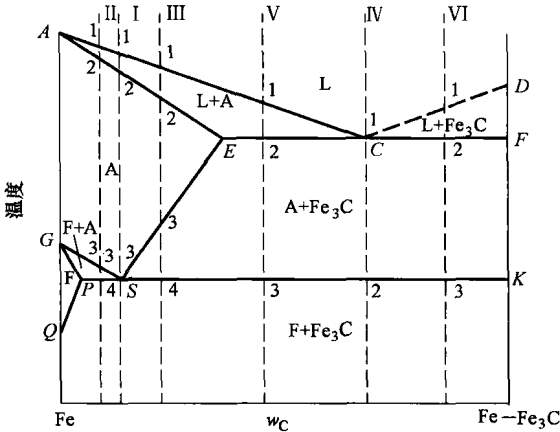


图 1-21 简化的铁碳相图

表 1-2 简化的铁碳相图中的特征点、线

特征点	温度/°C	w_c (%)	含 义	特征线	含 义
A	1538	0	纯铁的熔点	AC	液相线, 液态合金开始结晶出奥氏体
C	1148	4.3	共晶点	CD	液相脱溶线, 液相开始脱溶出 Fe_3C
D	≈ 1227	6.69	渗碳体的熔点	AE	固相线, 即奥氏体结晶终了线
E	1148	2.11	碳在奥氏体中的最大溶解度	GS	奥氏体转变为铁素体开始线, 即 A_3 线

(续)

特征点	温度/℃	w_c (%)	含 义	特征线	含 义
F	1148	6.69	渗碳体的成分	GP	奥氏体转变为铁素体终了线
G	912	0	$\alpha\text{Fe} \leftrightarrow \gamma\text{Fe}$ 转变点	ES	脱溶线, 奥氏体脱溶出 $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$, 即 A_{cm} 线
K	727	6.69	渗碳体的成分	PQ	脱溶线, 铁素体开始脱溶出 $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$
P	727	0.0218	碳在铁素体中最大溶解度	ECF	共晶转变线, $L_c \leftrightarrow \gamma_E + \text{Fe}_3\text{C}$
S	727	0.77	共析点	PSK	共析转变线, $\gamma_S \leftrightarrow \alpha_P + \text{Fe}_3\text{C}$, 即 A_1 线
Q	600	0.0057	碳在铁素体中的溶解度		

工业纯铁 $w_c < 0.0218\%$; 钢 $0.0218\% < w_c < 2.11\%$ 。根据室温组织的不同, 钢又可分为亚共析钢 $0.0218\% < w_c < 0.77\%$; 共析钢 $w_c = 0.77\%$; 过共析钢 $0.77\% < w_c < 2.11\%$ 。白口铸铁 $2.11\% < w_c < 6.69\%$ 。白口铸铁又可分为三种, 亚共晶白口铸铁 $2.11\% < w_c < 4.3\%$; 共晶白口铸铁 $w_c = 4.3\%$; 过共晶白口铸铁 $4.3\% < w_c < 6.69\%$ 。

下面分别以如图 1-21 所示的六种典型铁碳合金为例, 分析它们的结晶过程和室温下平衡组织。

(1) 共析钢: 如图 1-22 所示的合金 I, 在温度 1 以上全部为液体; 当温度降至 1 点以下, 在金属液体中开始结晶出奥氏体, 直到 2 点结晶完毕, 全部形成奥氏体; 当冷至 3 点, 奥氏体发生共析反应, 转变成铁素体和渗碳体的机械混合物——珠光体。

(2) 亚共析钢: 如图 1-22 所示的合金 II, 在 3 点温度以上的结晶过程与共析钢相同; 当温度降到 3 点以下, 奥氏体开始析出铁素体; 到 4 点时, 奥氏体的成分变为 $w_c = 0.77\%$,

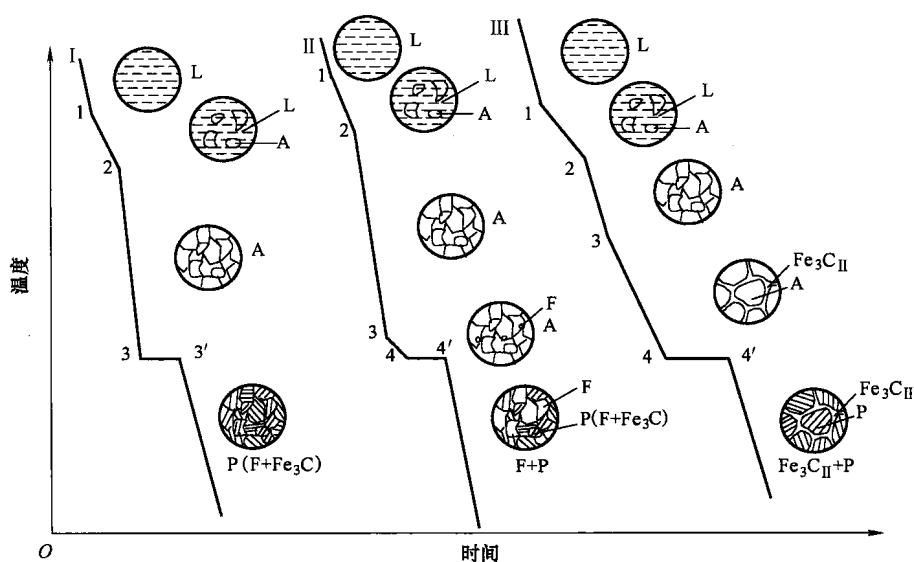


图 1-22 共析钢、亚共析钢、过共析钢的结晶过程示意图

此时发生共析转变，形成珠光体，原先析出的铁素体保持不变。转变结束后（室温时），合金的组织为铁素体和珠光体。

(3) 过共析钢：如图 1-22 所示的合金Ⅲ，在 3 点温度以上的结晶过程也与共析钢相同；当合金冷至 3 点温度时，奥氏体中的碳量达到饱和便开始析出二次渗碳体；随着温度的下降，二次渗碳体不断析出，使奥氏体的碳的质量分数逐渐减少，奥氏体的碳的质量分数沿 ES 线变化；当缓冷到 4 点温度时，奥氏体的碳的质量分数减到 0.77% 而发生共析转变，生成珠光体。室温组织为珠光体和二次渗碳体。二次渗碳体一般沿奥氏体晶界析出而呈网状分布，网状的二次渗碳体对钢的力学性能会产生不良的影响。

(4) 共晶白口铸铁：如图 1-23 所示的合金Ⅳ，当液态合金缓冷至 1 点温度时，将发生共晶转变，生成由共晶奥氏体和共晶渗碳体组成的（高温）莱氏体；由 1 点继续冷却，莱氏体中的奥氏体将不断析出二次渗碳体，奥氏体的成分沿 ES 线变化；温度降到 2 点时，奥氏体中碳的质量分数降到 0.77% 而发生共析转变生成珠光体。共晶白口铸铁室温下的组织是由珠光体、二次渗碳体和共晶渗碳体组成的，这种组织称为低温莱氏体（又称变态莱氏体），用符号 Ld' 表示。低温莱氏体仍保留了共晶转变后的形态特征。

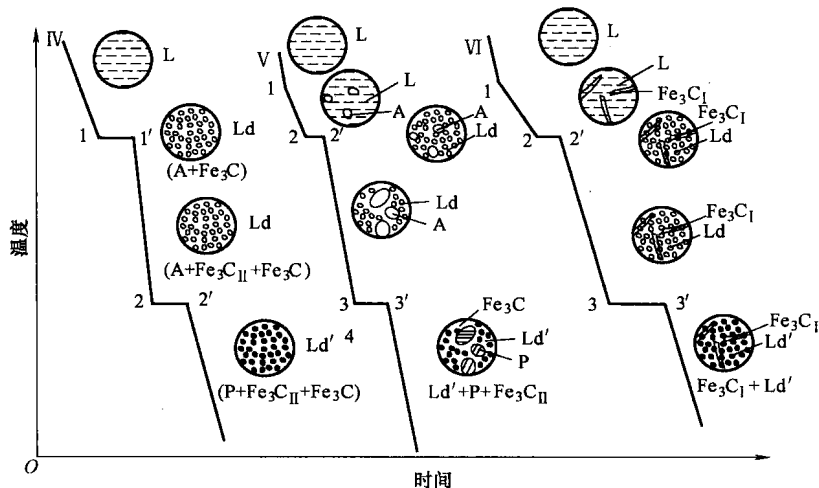


图 1-23 共晶白口铸铁、亚共晶白口铸铁、过共晶白口铸铁的结晶过程示意图

(5) 亚共晶白口铸铁：如图 1-23 所示的合金Ⅴ，当液态合金缓冷到 1 点温度时，开始结晶出奥氏体；随着温度的下降，结晶出的奥氏体量不断增多，其成分沿 AE 线变化，液相的成分沿 AC 线变化；冷至 2 点温度时，奥氏体碳的质量分数 $w_c = 2.11\%$ ，液相的碳的质量分数达到共晶点成分 ($w_c = 4.3\%$)，发生共晶转变，生成莱氏体，在随后的冷却过程中初生奥氏体和共晶奥氏体均析出二次渗碳体，其成分沿 ES 线变化；当温度降至 3 点时，奥氏体的 w_c 达到 0.77%，全部奥氏体将发生共析转变而生成珠光体。室温下亚共晶白口铸铁的组织由珠光体、二次渗碳体和低温莱氏体构成。

(6) 过共晶白口铸铁：如图 1-23 所示中的合金Ⅵ，其结晶过程与亚共晶白口铸铁类似，不同的是在共晶转变前，液相先结晶出一次渗碳体。当冷至 2 点温度时，液相成分 $w_c = 4.3\%$ 而发生共晶转变，形成莱氏体；在随后的冷却中，一次渗碳体不发生转变，莱氏体转变为低温莱氏体。