

材料成形技术基础

迟剑锋 吴山力 编



A1007297

吉林大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

材料成形技术基础 / 迟剑锋编. —长春: 吉林大学出版社, 2001. 9

ISBN 7-5601-2567-0

I. 材... II. 迟... III. 工程材料—成形—加工—基本知识 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 057842 号

材料成形技术基础

迟剑锋 吴山力 编

责任编辑、责任校对: 唐万新

封面设计: 孙 群

吉林大学出版社出版
(长春市解放大路 125 号)

吉林大学出版社发行
吉林省劳动彩印厂印刷

开本: 787 × 1092 毫米 1/16

2001 年 9 月第 1 版

印张: 11.375

2001 年 9 月第 1 次印刷

字数: 263 千字

印数: 1—3100 册

ISBN 7-5601-2567-0/TG·2

定价: 14.50 元

前 言

根据国家教育部颁布的调整本科专业目录,专业结构的调整在原有专业的基础上,拓宽了专业知识面,强调基础和应用的统一,尤其注重基础。

本书是为了适应高等学校工科学技术基础课程的要求,在吉林大学教务处和吉林大学出版社的指导和支持下编写的,是配合工科学技术基础课教学改革的系列教材之一。本书可作为高等学校工科机械类各专业的教材,也可作为工业企业管理类和材料类专业、职工大学、电视大学、自学考试的教材,并可供有关技术人员参考。

本书以“大工程”为视野,突出技术的应用,特别是加工工艺,注意对各种成形方法进行必要的归纳、拓宽与加深,也注意了与有关课程的分工和衔接。在选材和体系结构上,注重基本理论与实际生产的联系,旨在便于教学,使学生通过本课程的学习,掌握合理选择毛坯和零件的加工方法,培养分析、判断零件结构工艺性的能力,为学习其他有关课程及以后从事机械设计和制造方面的工作奠定必要的基础。

本书内容包括:钢铁材料的基本知识,铸造、压力加工和焊接等金属材料的成形方法,以及高分子材料及其成形方法等,并对有关的新工艺、新技术做了扼要介绍。

本书另有《材料成形技术基础习题集》配套,故书中未编入复习题与作业题。

参加本书编写工作的有:高贵天、张长春、孙广平、郭锡殿、迟剑锋和吴山力等。由迟剑锋和吴山力主编。苏玉林、聂振铭和吴鹏等老师在本书编写过程中提出了许多宝贵意见,并进行了审阅。

本书得到吉林大学教材建设基金的资助。

由于水平所限,本书中难免存在不少缺点和错误,恳请读者批评指正。

编 者
2001年6月

目 录

第一章 钢铁材料的基本知识	1
§ 1-1 纯铁及铁碳合金	1
§ 1-1-1 纯铁的晶体结构及其结晶	1
§ 1-1-2 铁碳合金的基本组织	4
§ 1-1-3 铁碳合金状态图	5
§ 1-1-4 化学成分对碳素钢性能的影响	8
§ 1-1-5 钢的分类与编号	8
§ 1-2 钢的热处理	10
§ 1-2-1 钢在加热和冷却时的组织转变	11
§ 1-2-2 钢的退火与正火	13
§ 1-2-3 钢的淬火与回火	14
第二章 铸造	16
§ 2-1 铸造工艺基础	16
§ 2-1-1 液态合金的充型	16
§ 2-1-2 铸件的凝固	17
§ 2-1-3 铸件的收缩	18
§ 2-1-4 铸件中的气孔	22
§ 2-2 常用合金的铸造	23
§ 2-2-1 合金的铸造性能	23
§ 2-2-2 铸铁的铸造生产	24
§ 2-2-3 铸钢的铸造生产	30
§ 2-2-4 非铁合金铸件的生产	32
§ 2-3 铸造方法	34
§ 2-3-1 砂型铸造	34
§ 2-3-2 熔模铸造	36
§ 2-3-3 金属型铸造	38
§ 2-3-4 压力铸造	39
§ 2-3-5 低压铸造	40
§ 2-3-6 离心铸造	40
§ 2-3-7 敷砂金属型铸造和电渣铸造	41
§ 2-4 零件的铸造结构工艺性和铸造工艺的制定	42
§ 2-4-1 零件的铸造结构工艺性	42

§ 2-4-2 铸造工艺图的制定	49
§ 2-4-3 各种铸造方法的选择	54
第三章 金属压力加工	56
§ 3-1 金属的塑性成形工艺基础	58
§ 3-1-1 金属塑性变形的实质	58
§ 3-1-2 金属塑性变形的基本规律	59
§ 3-1-3 塑性变形后金属的组织 and 性能	60
§ 3-2 常用金属的锻造性能	63
§ 3-2-1 金属的锻造性能及其影响因素	63
§ 3-2-2 钢的锻造特点	65
§ 3-2-3 非铁合金的锻造特点	66
§ 3-3 锻造方法	67
§ 3-3-1 自由锻	67
§ 3-3-2 胎模锻	68
§ 3-3-3 锤上模锻	71
§ 3-3-4 曲柄压力机上模锻	74
§ 3-3-5 平锻机上模锻	76
§ 3-3-6 摩擦压力机上模锻	77
§ 3-3-7 其他压力加工方法	78
§ 3-4 零件的锻造结构工艺性和锻造工艺的制定	80
§ 3-4-1 零件的锻造结构工艺性	80
§ 3-4-2 锻造工艺方案的选择	82
§ 3-4-3 锻造工艺规程的制定	83
§ 3-5 板料冲压	90
§ 3-5-1 冲压设备	90
§ 3-5-2 板料冲压的基本工序	90
§ 3-5-3 冲模的分类和结构	96
§ 3-5-4 板料冲压件结构工艺性	98
第四章 焊接	101
§ 4-1 金属熔焊工艺基础	102
§ 4-1-1 焊接热源	102
§ 4-1-2 熔焊冶金	103
§ 4-1-3 焊接接头的金属组织及性能	105
§ 4-1-4 焊接应力、变形及裂纹	108
§ 4-2 焊接方法	112
§ 4-2-1 手工电弧焊	112
§ 4-2-2 埋弧自动焊	117
§ 4-2-3 气体保护焊	118

§ 4-2-4 压焊	120
§ 4-2-5 钎焊	125
§ 4-2-6 其他焊接方法	126
§ 4-3 常用金属材料的焊接	129
§ 4-3-1 金属材料的焊接性	129
§ 4-3-2 钢的焊接	130
§ 4-3-3 铸铁的焊补	133
§ 4-3-4 非铁金属的焊接	134
§ 4-4 焊接结构设计	135
§ 4-4-1 焊接结构材料的选择	135
§ 4-4-2 焊接方法的选择	135
§ 4-4-3 焊接接头形式的选择	136
§ 4-4-4 焊接结构工艺性	138
§ 4-4-5 焊缝符号的表示方法	140
第五章 高分子材料与成形	143
§ 5-1 高分子材料简介	143
§ 5-1-1 高分子材料的分类	143
§ 5-1-2 高分子材料添加剂	145
§ 5-2 高分子材料成形工艺基础	147
§ 5-2-1 聚合物材料的加工性	148
§ 5-2-2 聚合物的结晶	151
§ 5-2-3 成形过程中的分子取向	152
§ 5-2-4 聚合物的降解和交联	154
§ 5-3 高分子材料成形方法	155
§ 5-3-1 注射成形	155
§ 5-3-2 挤出成形	160
§ 5-3-3 压制成形	162
§ 5-3-4 热成形	163
§ 5-3-5 泡沫塑料成形	163
§ 5-3-6 中空吹塑成形	165
§ 5-3-7 橡胶成形加工	166
§ 5-4 塑料制品的设计	167
§ 5-4-1 塑料制品的精度及表面质量要求	167
§ 5-4-2 塑料件的结构设计	169
§ 5-4-3 孔与螺纹的设计	172
§ 5-4-4 其他设计	173

第一章 钢铁材料的基本知识

钢铁材料因为具有优良的使用性能和工艺性能，是制造金属结构、机械零件和工具的最主要材料。使用性能是指材料在使用过程中所应该具备的性能，主要有力学性能、物理性能和化学性能等。力学性能是指材料在外力（或称载荷）的作用下，所表现出的性能，主要有强度、硬度、塑性和韧性等；物理性能主要有密度、熔点、导电性、导热性和磁性等；化学性能主要有耐酸性、耐碱性和抗氧化性等。工艺性能是指材料能否易于进行热、冷加工的性能，主要有铸造性、可锻性、焊接性、机械加工性等，它们实质上是材料的力学、物理和化学等性能在成形和加工过程中的综合反映。钢铁材料的这些性能与其化学成分、组织有关。

本篇主要介绍铁碳合金状态图、铁碳合金的分类和钢的热处理，以便为学习本门课程后续章节奠定必要的理论基础。

§ 1-1 纯铁及铁碳合金

§ 1-1-1 纯铁的晶体结构及其结晶

工业上使用的金属材料繁多，而它们都具有各自的性能。各种金属材料的性能是由其化学成分和内部结构所决定的。因此，要了解金属材料的性能，必须首先了解其内部结构。

一、纯铁的晶体构造

固态物质按原子排列的特点分为两大类：晶体和非晶体。晶体中，内部原子排列是有规律的，按一定次序做周期性排列。一般情况下，固态金属都是晶体。通过 X 射线衍射，可以分析晶体内部原子的排列规律。图 1-1 (a) 所示为室温下的纯铁内部结构示意图。为了便于分析和描述铁原子排列的规律，把每个原子抽象成一个点，这些点用假想线连接起来就得到一个空间格架。这种用线条连接起来的空间格架称为晶格，如图 1-1 (b) 所示。由于铁原子重复排列的规律性，把代表晶格的、最基本的几何单元叫做晶胞，如图 1-1 (c) 所示。晶胞中各棱边的长度叫做晶格常数，其大小以 Å（埃）来度量（ $1 \text{ Å} = 10^{-8} \text{ cm}$ ）。

材料的性能除与元素的种类有关外，还与晶格的类型、晶格常数等有关。

在 $1538 \sim 1394 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $912 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下，纯铁的晶胞是一个长、宽、高相等的立方体，在立方体的八个顶角上和立方体的中心各有一个原子，这种晶胞称为体心立方晶胞，如图 1-1 (c) 所示。

纯铁在 $1394 \sim 912 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，晶胞也是一个立方体，除在立方体的八个顶角各有一个原子外，在立方体的六个面的中心也各有一个原子，如图 1-2 所示。这种晶胞称为面心立方晶胞。具有面心立方晶格的纯铁塑性很好。

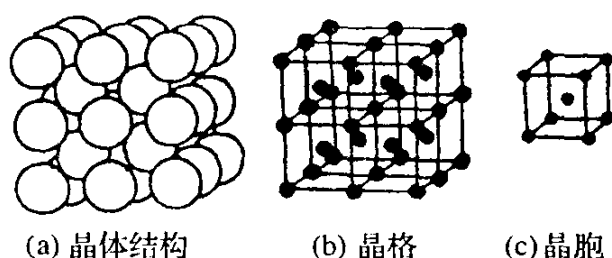


图 1-1 体心立方晶格结构示意图

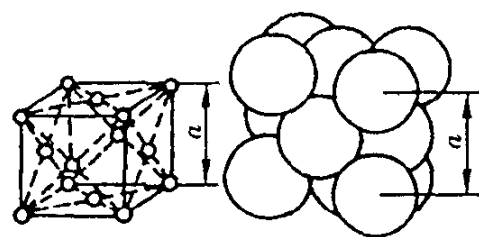


图 1-2 面心立方晶胞

必须指出，晶格中的原子并非静止不动的，而是按一定的振幅在振动着，振幅随温度的升高而增大，原子活动能力也就增强。

二、纯铁的一次结晶

(1) 结晶概念：液态金属冷却到凝固温度时，原子由无序状态转变为按一定的几何形状做有序排列的过程叫做一次结晶。

纯铁的一次结晶，是在一个恒定温度下进行的。纯铁的平衡结晶温度，亦称理论结晶温度，用 T_0 表示。高于此温度便发生熔化，低于此温度才能进行结晶。实际结晶温度用 T_n 表示，它总是低于理论结晶温度。液态铁冷却到理论结晶温度以下才开始结晶的现象叫做过冷。理论结晶温度与实际结晶温度之差称为过冷度，用 ΔT 表示，即 $\Delta T = T_0 - T_n$ 。

纯铁的实际结晶温度可用热分析的方法测定。其具体步骤：首先将铁熔化，然后以极缓慢的速度进行冷却，在冷却过程中，每隔一定时间记录一次温度，将记录的数据绘制成如图 1-3 所示的冷却曲线，即纯铁的温度随时间变化曲线。从冷却曲线看出，纯铁一次结晶时，由于放出的结晶潜热补偿了它向环境散失的热量，使温度保持不变，曲线上出现一个水平线段，结晶结束后，温度又下降，即固态铁的冷却。冷却速度愈慢，实际结晶温度愈接近理论结晶温度。对同一金属而言，其实际的过冷度值 (ΔT) 是与冷却速度密切相关的。冷却速度愈快，实际结晶温度便愈低，过冷度就愈大；反之，冷却速度愈慢，则过冷度愈小，如图 1-3 所示的 ΔT_1 、 ΔT_2 。

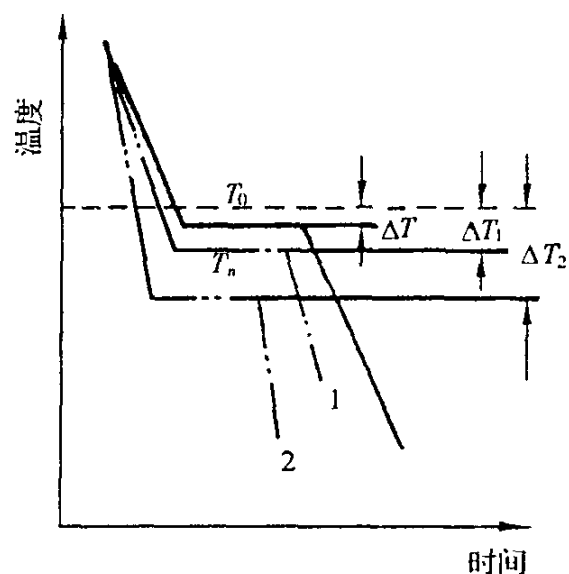


图 1-3 纯铁一次结晶时的冷却曲线示意图

(2) 结晶过程：随着温度的下降，液态铁原子活动能力逐渐减小，当温度降低到结晶温度以下时，在液态铁内部，有一些原子自发地聚集在一起，并按其固有规律排列起来，形成规则排列的原子集团而成为结晶的核心，这种核心叫做自发晶核。另一方面，液体中一些外来的微细的固态质点也可能成为晶核，这叫做外来晶核。当晶核出现后，液态铁的原子就以它为中心，按一定的几何形状不断地向它聚集，促使晶核不断地长大。在原有晶核长大的同时，液态铁中新的晶核仍陆续产生，而且也不断长大，这样就有许多晶核同时在不同程度上长大。起初，各个小晶体都是按自己的方位自由地生长，当它们长大到与相邻的晶体互相抵触时，这个方向的长大便停止了，当全部晶体都长大到各个方向互相抵触时，液态铁耗尽，结晶过程也就完成了。最后便形成许多外形不规则的，大小不等的，排列方向不相同的小晶体。由每个晶核长成的不规则小晶体叫做晶粒。晶

粒与晶粒之间的接触面（或交界面）叫做晶界。图 1-4 为纯铁一次结晶过程示意图。

综上所述，纯铁的一次结晶可分为两个阶段，即晶核形成和晶核长大，纯铁的一次结晶过程就是晶核不断形成和长大的过程。实验证明，这个形核和长大过程是一切晶体结晶的普遍规律。

在通常情况下，纯铁一次结晶以后形成了许多晶粒，这种由许多晶粒组成的晶体称多晶体，工业上使用的金属材料大多数都是多晶体，如图 1-5 所示。纯铁一次结晶后晶粒的大小（或粗细）对铁的力学性能影响很大，晶粒愈细力学性能愈好，因此，一般都希望得到细晶粒的金属。

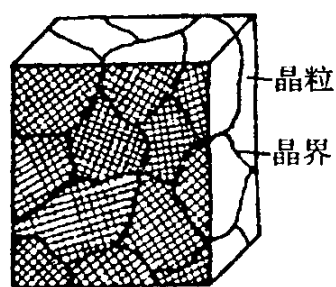


图 1-5 多晶体示意图

此，一般都希望得到细晶粒的金属。

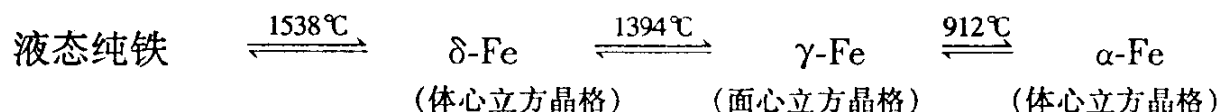
在工业生产中，细化晶粒方法有多种。加快冷却速度，即增大过冷度，可以提高自发晶核的形成率，如金属型铸造比砂型铸造能够获得较细晶粒的铸件；在液态金属中加入某些固态质点，可以起外来晶核的作用，从而达到细化晶粒的目的，如孕育处理（或称变质处理）。金属在固态下，某些加工方法也可以细化晶粒，如锻造加工、热处理等。

三、纯铁的同素异构转变

多数金属在结晶后的晶格类型都保持不变，但有些金属（如铁、锡、钛、锰等）的晶格类型，却因温度而异。一种金属能以几种晶格类型存在的性质，叫做同素异构性。

金属在固态时改变其晶格类型的过程，叫做金属的同素异构转变。这一转变与液态金属的结晶过程很相似，同样包括晶核形成和晶核长大两个阶段，故又叫做二次结晶（或重结晶），以区别于由液态转变为固态的一次结晶。

图 1-6 是纯铁的冷却曲线和晶格形式的变化。纯铁结晶为固态后，继续冷却到 1394 °C 和 912 °C 时先后发生两次晶格类型的转变。在 1538 ~ 1394 °C 之间，纯铁具有体心立方晶格，称为 δ -Fe；在 1394 ~ 912 °C 之间，纯铁为面心立方晶格，称为 γ -Fe；在 912 °C 以下时，纯铁又为体心立方晶格，称为 α -Fe。这些转变表示如下：



纯铁在同素异构转变时有体积变化。从原子的排列情况来看，面心立方晶格中铁原子排列得比较紧密，所以在质量相同的条件下， γ -Fe 的体积比 α -Fe 要小。如将一块纯铁加热到 912 °C，即由 α -Fe 变为 γ -Fe，这时体积要缩小；反之，将 γ -Fe 冷却转变为 α -Fe 时，体积会增大。这种体积的变化，有可能引起结构应力。

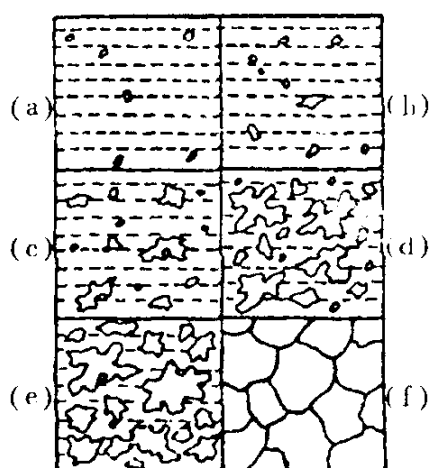


图 1-4 纯铁一次结晶过程示意图

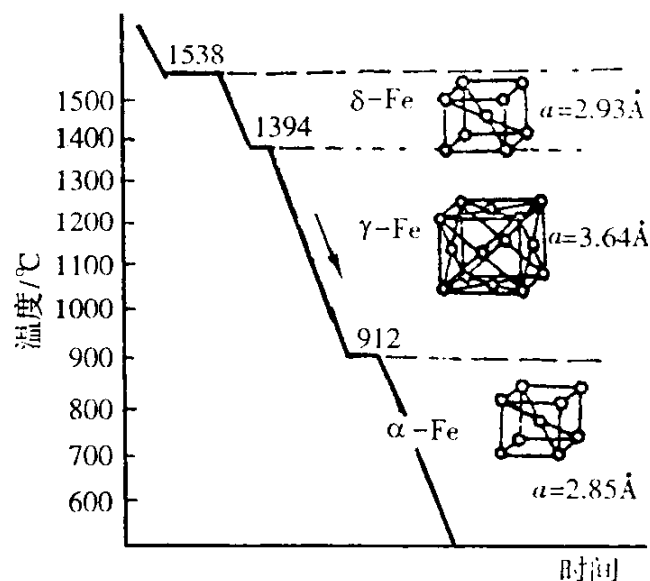


图 1-6 纯铁的冷却曲线

铁在固态下会发生同素异构转变, 这是由铁的内部结构所决定的, 铁的同素异构转变是钢铁材料能够进行热处理的重要依据.

§ 1-1-2 铁碳合金的基本组织

在工业上广泛应用的金属材料是合金. 所谓合金, 就是以一种金属为基础, 加入了其他金属或非金属元素, 经过熔炼、烧结或其他方法而制成的具有金属特性的材料. 工业上广泛使用的钢和铸铁就是由铁和碳组成的合金. 组成合金的元素叫做组元, 组元一般指化学元素, 但稳定化合物也可以看成是一个组元.

在合金中, 凡化学成分和晶体结构相同, 并与其他部分有界面分开的均匀组成部分, 叫做相. 合金和纯金属在性能上差异很大, 其主要原因是两者在晶体结构上不同. 合金的结构比纯金属的复杂, 因为组成合金的元素相互作用, 会形成各种不同的相. 纯金属在固态时是一个相——固相; 当温度升高到其熔点时开始熔化, 在熔化过程中, 为固相与液相共存的两相混合物; 当温度高于熔点时, 则又成为一个相——液相. 在合金中, 由于组元的相互作用, 可能形成更多的不同的相.

根据铁碳合金组元(铁和碳)在结晶时的相互作用, 可以形成固溶体(如铁素体和奥氏体)、金属化合物(如渗碳体)和机械混合物(如珠光体). 现将铁碳合金在固态下出现的几种常见的基本组织分述如下.

(1) 铁素体. 碳溶于 α -Fe 中形成的固溶体, 用符号 F 表示. 铁素体保持着 α -Fe 的体心立方晶格.

碳在 α -Fe 中的溶解度很小, 在 727 °C 时, 溶解度为 0.0218%, 随着温度的降低, 溶解度逐渐减小, 在 600 °C 时溶解度约为 0.0057%, 在室温时溶解度仅为 0.0008%. 铁素体的性能与纯铁相近, 即强度和硬度较低, 塑性、韧性好.

(2) 奥氏体. 碳溶解在 γ -Fe 中形成的固溶体, 用符号 A 来表示. 奥氏体保持着 γ -Fe 的面心立方晶格.

碳在 γ -Fe 中的溶解度比碳在 α -Fe 中的溶解度大, 在 1148 °C 时的溶解度可达 2.11%. 随着温度的降低, γ -Fe 中碳的溶解度降低, 到 727 °C 时, 溶解度为 0.77%.

稳定的奥氏体在碳素钢内存在的最低温度是 727 °C. 由于碳原子的大量溶入, 使奥氏体具有一定的强度和硬度, 塑性也很好. 奥氏体是绝大多数钢在高温进行锻造时所要求的组织.

(3) 渗碳体. 碳的质量分数为 6.69% 的铁和碳的金属化合物, 其分子式是 Fe_3C . 渗碳体具有复杂的晶格形式, 它与铁和碳的晶格形式截然不同. 渗碳体的硬度很高, 但塑性很差, 是一种硬而脆的组织. 渗碳体在钢中主要起强化作用.

(4) 珠光体. 铁素体和渗碳体的机械混合物, 用符号 P 来表示. 在平衡条件下, 珠光体中碳的质量分数为 0.77%, 由于它是由硬而脆的渗碳体和软的铁素体层片相间排列组成, 故珠光体的力学性能介于铁素体和渗碳体之间, 它的强度较高, 硬度适中, 塑性、韧性较低.

铁碳合金的基本组织、符号、碳的质量分数及力学性能列于表 1-1.

表 1-1 铁碳合金的组织及力学性能

组织名称	符 号	碳的质量分数 / %	σ_b / MPa	HBS	δ / %	a_k / J·cm ⁻²
铁素体	F	~ 0.0218	180 ~ 280	50 ~ 80	30 ~ 50	160 ~ 200
奥氏体	A	~ 2.11	—	120 ~ 220	40 ~ 60	—
渗碳体	Fe ₃ C	6.69	30	相当 800	0	0
珠光体	P	0.77	750	180	20 ~ 25	30 ~ 40

§ 1-1-3 铁碳合金状态图

铁碳合金状态图是用实验方法做出的温度—成分坐标图,如图 1-7 所示。因为碳的质量分数大于 6.69% 的铁碳合金,在工业上没有实用的意义,所以图中横坐标仅标出碳的质量分数小于 6.69% 的合金部分。当碳的质量分数为 6.69% 时,铁和碳形成的 Fe₃C,可以看做是合金的一个组元,因此,这个状态图实际上是 Fe-Fe₃C 的状态图,它是研究钢和生铁的成分、温度与组织之间关系的重要工具。

一、铁碳合金状态图中主要点和线的意义

1. 各特性点的含义

在铁碳合金状态图中用字母标出的点都表示一定的特性(成分和温度),所以叫做特性点。各主要特性点的含义列于表 1-2。

表 1-2 Fe-Fe₃C 状态图中部分特性点

特性点符号	温度 / °C	碳的质量分数 / %	含 义
A	1538	0	纯铁的熔点
C	1148	4.3	共晶点 $L_{4.3\%} \xrightarrow{1148^\circ\text{C}} A_{2.11\%} + \text{Fe}_3\text{C}_{6.69\%}$
D	1227	6.69	渗碳体的熔点
E	1148	2.11	碳在 γ -Fe 中的最大溶解度
G	912	0	纯铁的同素异构转变点 $\alpha\text{-Fe} \xrightarrow{912^\circ\text{C}} \gamma\text{-Fe}$
P	727	0.0218	碳在 α -Fe 中的最大溶解度
S	727	0.77	共析点 $A_{0.77\%} \xrightarrow{727^\circ\text{C}} F_{0.0218\%} + \text{Fe}_3\text{C}_{6.69\%}$
Q	600	0.0057	600 °C 时碳在 α -Fe 中的最大溶解度

2. 一些主要线的含义

铁碳合金状态图中各条线表示铁碳合金内部组织发生转变时的界线,所以这些线就是组织转变线。现将图 1-7 中的一些主要线的含义简略介绍如下:

ABCD 线——液相线,即液态合金冷却到此线时开始结晶。在此线以上的区域为液相。

AHJECF 线——固相线,当合金冷却到此线,液态金属全部结晶为固相。在此线以下的区域为固相。

AHJE 线——钢的固相线。当液态合金冷却到此线时全部结晶为固相,反之,加热到此线时,钢开始熔化。

ECF 线——生铁的固相线,又叫做共晶线。碳的质量分数在 2.11 ~ 6.69% 的合金,当

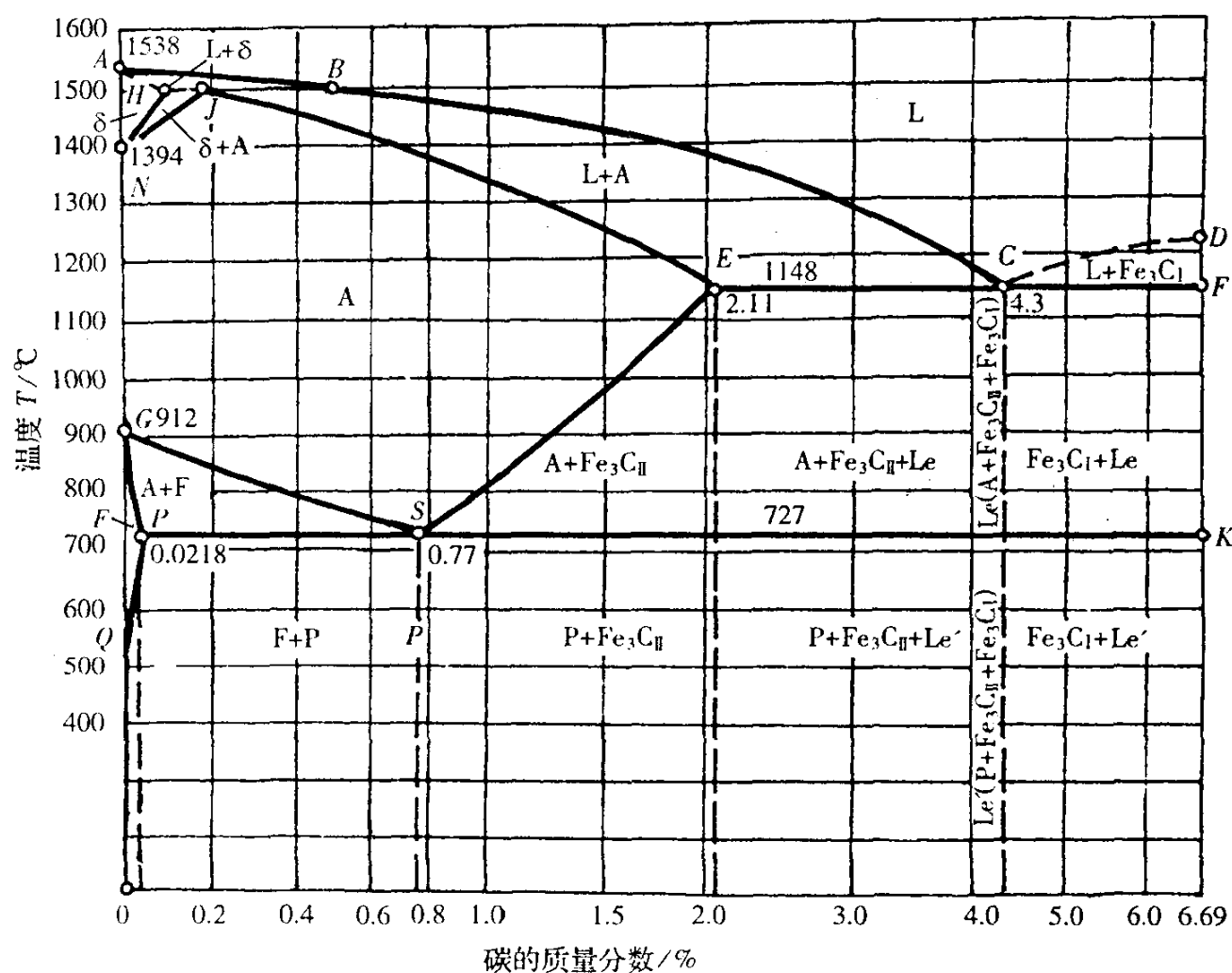


图 1-7 铁碳合金状态图

冷却到此线时 (1148 °C)，都将发生共晶转变，即 $L_{4.3\%} \xrightarrow{1148^{\circ}\text{C}} A_{2.11\%} + \text{Fe}_3\text{C}_{6.69\%}$ ，形成莱氏体，它是奥氏体和渗碳体的机械混合物，用 L_e 表示。727 °C 以下的莱氏体是珠光体和渗碳体的机械混合物，用 L_e' 表示。

GS 线——冷却时，从不同碳的质量分数的奥氏体中结晶出铁素体的开始线，通常称为 A_3 线。

ES 线——碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 中的溶解度线，通常也称之为 A_{cm} 线。在 1148 °C 时，奥氏体中碳的质量分数可达 2.11%，而在 727 °C 时仅为 0.77%，所以碳的质量分数大于 0.77% 的奥氏体，冷却过程中都将从奥氏体中析出渗碳体。为了区别，自液相中结晶的渗碳体叫一次渗碳体 (Fe_3C_I)，从奥氏体中析出的渗碳体称为二次渗碳体 (Fe_3C_{II})。

PSK 线——共析线，通常也称之为 A_1 线。碳的质量分数为 0.0218 ~ 6.69% 的合金，当冷却到此线时 (727 °C)，都将发生共析转变。从一定成分的固相中，在一定温度下，同时结晶出两种不同成分的固相，即 $A_{0.77\%} \xrightarrow{727^{\circ}\text{C}} F_{0.0218\%} + \text{Fe}_3\text{C}_{6.69\%}$ ，所形成的共析体称为珠光体。

二、铁碳合金的分类

根据碳的质量分数及组织的不同，铁碳合金分为三大类，如表 1-3 所示。

表 1-3 铁碳合金的分类、碳的质量分数及平衡组织

分 类	碳的质量分数 / %	平衡组织	符 号
工业纯铁	< 0.0218	铁素体	F
钢	亚共析钢	铁素体 + 珠光体	F + P
	共析钢	珠光体	P
	过共析钢	珠光体 + 二次渗碳体	P + $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$
生铁	亚共晶白口生铁	珠光体 + 二次渗碳体 + 莱氏体	P + $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ + L'e
	共晶白口生铁	莱氏体	L'e
	过共晶白口生铁	莱氏体 + 一次渗碳体	L'e + $\text{Fe}_3\text{C}_\text{I}$

三、从状态图看钢的组织转变

图 1-8 为简化后的铁碳合金状态图。现以几种典型的铁碳合金为例，分析它们在结晶和冷却过程中组织转变的规律。

1. 共析钢的组织转变

图 1-8 中合金 I 为碳的质量分数为 0.77% 的共析钢，冷却过程中的组织转变如图 1-9 所示。当温度冷却到 1 点，开始从液态金属中结晶出奥氏体，以后奥氏体的数量随着温度的降低而逐新增多，直至 2 点结晶完毕。在 2~3 点间为单一的奥氏体，当冷却到 3 点（S 点），奥氏体在恒温下发生共析转变，全部转变为珠光体。温度继续下降，珠光体不再发生组织转变。共析钢室温时的平衡组织为珠光体。

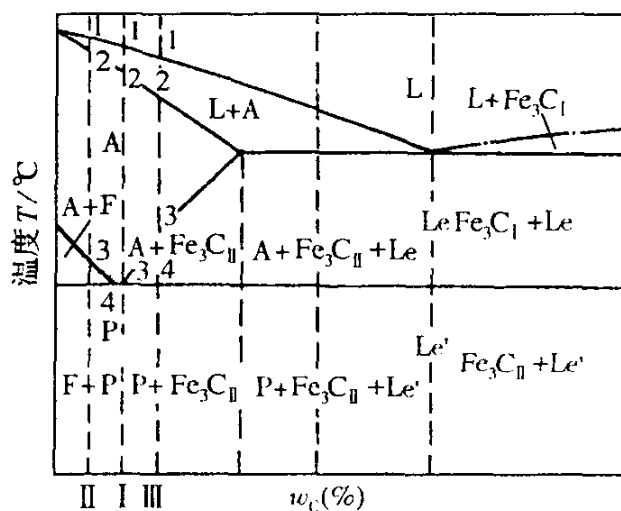
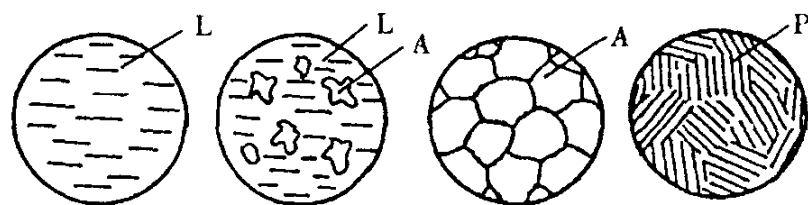
图 1-8 简化后的 Fe-Fe₃C 状态图

图 1-9 共析钢组织转变示意图

2. 亚共析钢的组织转变

图 1-8 中合金 II 为碳的质量分数为 0.55% 的亚共析钢，冷却过程中的组织转变如图 1-10 所示。当冷却到 1，开始从液态金属中结晶出奥氏体。温度降到 2 点，液态金属全部凝固。在 2~3 点之间是单一的奥氏体。温度降到 3 点，从奥氏体开始结晶出铁素体。温度降到 4 点，剩余的奥氏体在恒温下转变成珠光体。4 点以下不再发生组织转变。亚共析钢在室

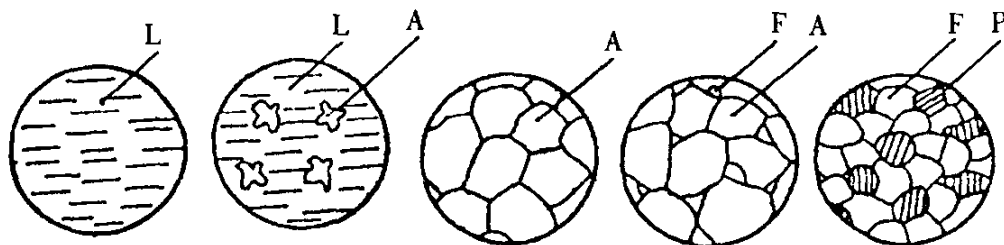


图 1-10 亚共析钢的组织转变示意图

温下的平衡组织为铁素体和珠光体。

3. 过共析钢的组织转变

图 1-8 中合金Ⅲ为碳的质量分数为 1.3% 的过共析钢, 冷却过程中的组织转变如图 1-11 所示。当温度冷却到 1 点以后, 从液态金属中结晶出奥氏体, 直到 2 点结晶完毕。在 2~3 点之间是单一的奥氏体。冷却到 3 点, 开始从奥氏体中析出二次渗碳体。以后随着温度的下降, 析出的二次渗碳体不断增加。在 PSK 线上的 4 点, 剩余的奥氏体发生共析转变, 转变为珠光体。4 点以后组织不再发生变化。过共析钢的室温平衡组织为珠光体和网状的二次渗碳体。

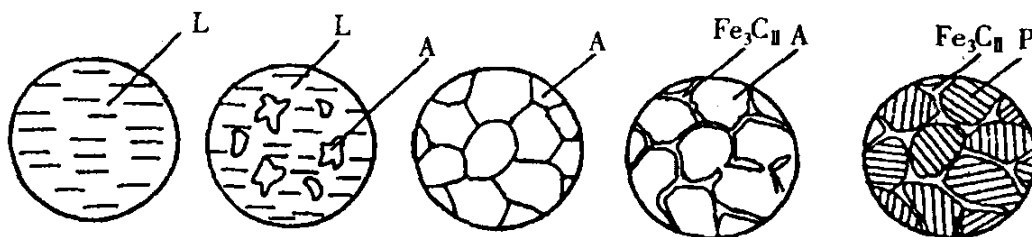


图 1-11 过共析钢组织转变示意图

§ 1-1-4 化学成分对碳素钢性能的影响

碳的质量分数低于 2.11% 并含有少量硅、锰、硫和磷等杂质的铁碳合金称为碳素钢。化学成分对碳素钢的性能影响很大。

碳是碳素钢中最重要的元素。在钢中, 碳主要以渗碳体形式存在。当钢中碳的质量分数小于 0.9% 时, 随着碳的质量分数的增加, 钢的强度和硬度不断提高, 而塑性和韧性不断下降。这是因为以铁素体为基体的钢中, 片层状渗碳体起着强化作用。钢中珠光体愈多, 其强度和硬度愈高, 如图 1-12 所示。但是, 当钢中碳的质量分数大于 0.9%, 钢中出现了网状渗碳体, 这时钢的硬度虽然随着碳的质量分数增加而不断提高, 却导致钢的强度下降, 塑性、韧性继续下降。

硅、锰、硫和磷等元素对钢的组织 and 性能也有一定影响。硅和锰是有益元素, 它们溶于 α -Fe 内形成的固溶体或溶于渗碳体内使钢的强度和硬度提高。硫和磷是有害元素。硫常以 FeS 形式存在, FeS 与 Fe 形成低熔点共晶体 (熔点 $985^\circ C$), 沿晶界分布。当钢中含硫较多时, 在 $800 \sim 1250^\circ C$ 进行锻造时, 由于晶界分布的低熔点共晶体已呈熔融状态, 削弱了晶粒之间的连接, 会造成钢材开裂, 称为热脆性。磷可溶于 α -Fe 内形成固溶体, 使钢的强度和硬度提高, 而塑性和韧性下降。磷在结晶时, 易形成脆性很大的 Fe_3P , 使钢在室温下的塑性和韧性急剧下降, 称为冷脆性。钢中磷的质量分数达到 0.1% 时, 冷脆性影响就相当显著。

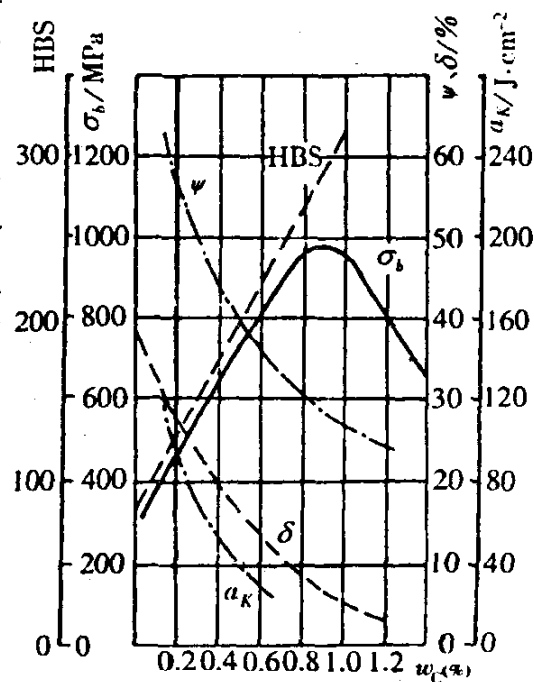


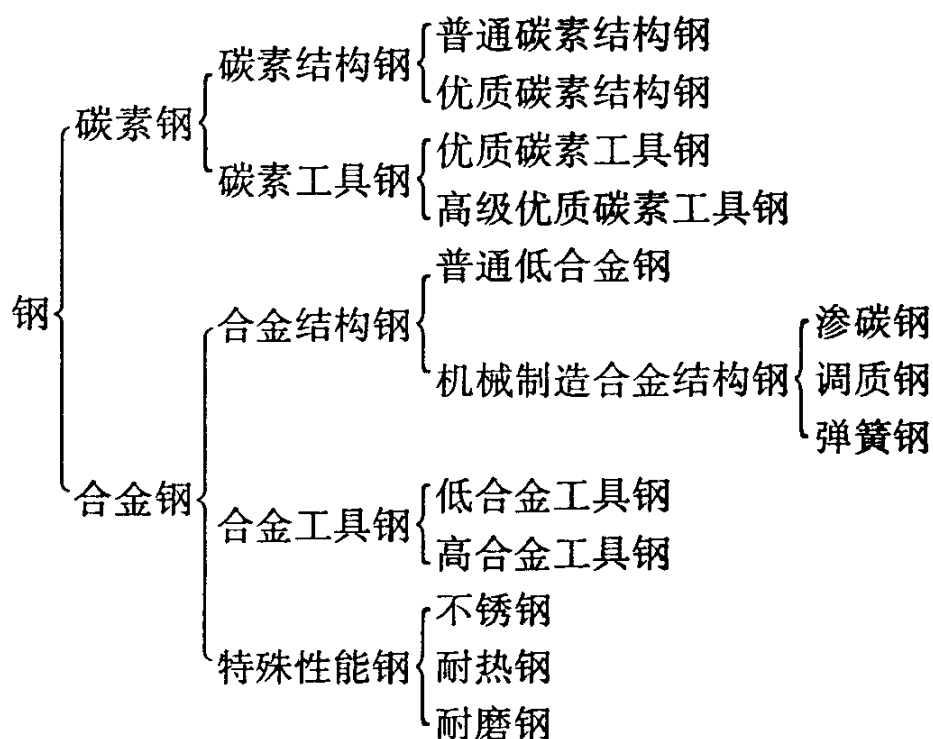
图 1-12 碳的质量分数对钢力学性能的影响 (正火状态)

§ 1-1-5 钢的分类与编号

钢的种类繁多。按化学成分, 可概括为碳素钢与合金钢。按用途, 可分为结构钢, 工具

钢和特殊性能钢。按冶炼的质量来划分，有普通钢、优质钢和高级优质钢。

钢的综合分类如下：



一、碳素钢

根据碳素钢中碳的质量分数的多少，分为低碳钢 ($w_c < 0.25\%$)，中碳钢 ($w_c = 0.25 \sim 0.6\%$) 和高碳钢 ($w_c > 0.6\%$)。碳素钢，按质量与用途分为三类：

1. 普通碳素结构钢

普通碳素结构钢中碳的质量分数为 $0.06 \sim 0.38\%$ 。这类钢价格便宜，通常以热轧钢板、钢管、型钢、棒钢、盘圆等供应，一般不进行热处理而直接在供应状态下使用。普通碳素结构钢主要用于建筑、桥梁、船舶、车辆制造等部门制造各种工程构件及普通机器零件，故又称为建筑用钢。

普通碳素结构钢的牌号表示方法及符号有如下规定：钢的牌号由代表屈服点（即屈服强度）的字母、屈服点数值（MPa）、质量等级符号和脱氧方法符号等四个部分按顺序组成。例如：Q235-A·F，它表示屈服点 $\sigma_s \geq 235\text{MPa}$ 的 A 级、沸腾钢。现将各规定符号内容说明如下：Q 为钢材屈服点“屈”字；汉语拼音首位字母 A、B、C、D 分别为质量等级，并逐级升高；F 为沸腾钢，B 为半镇静钢，Z 为镇静钢，TZ 为特殊镇静钢。

这类钢按其屈服点数值（MPa）可分为 5 种牌号：Q195，Q215，Q235，Q255，Q275。

2. 优质碳素结构钢

优质是指钢中磷的质量分数 $\leq 0.04\%$ ，硫的质量分数 $\leq 0.04\%$ 而言的。这类钢的编号以两位数字来表示，这两位数字表示该钢平均碳的质量分数的万分之几。钢号有 08，10，15，20，…，70 等。例如 08 钢表示平均碳的质量分数为 0.08% ，45 钢表示平均碳的质量分数为 0.45% 。这类钢供应时要保证力学性能和化学成分，使用前一般都要经过热处理。它适于制造比较重要的机械零件，如轴、齿轮、丝杠、连杆、弹簧等。

3. 碳素工具钢

这类钢的编号是在“碳”字或“T”后面附以数字来表示，数字表示该钢平均碳的质量

分数的千分之几。钢号有碳 7, 碳 8, …, 碳 13 或 T7, T8, …, T13。例如碳 10 (T10) 表示平均碳的质量分数为 1.0% 的优质碳素工具钢。若在钢号后面加“高”或“A”字, 则为高级优质碳素工具钢。碳素工具钢在使用前都要经过热处理, 以提高其硬度和耐磨性。主要用于制造刀具、量具、模具等。

二、合金钢

在碳素钢的基础上, 特意加入一种或数种合金元素, 如铬、铝、钨、钒、钛等, 或者加入较多硅、锰元素的钢, 称为合金钢。根据合金元素质量分数总量的多少, 合金钢又分为低合金钢 (<5%)、中合金钢 (5~10%) 和高合金钢 (>10%)。合金钢按用途分为:

1. 合金结构钢

它包括普通低合金钢、合金渗碳钢、合金调质钢和合金弹簧钢。这类钢编号是采用两位数字加元素符号加数字来表示。前两位数字表示钢中平均碳的质量分数的万分之几; 元素符号表示钢中所含合金元素, 元素后的数字是该元素平均质量分数的百分数。合金元素的质量分数少于 1.5% 时, 只标元素符号。平均质量分数等于或大于 1.5%, 2.5%, 3.5%, …, 则相应地在元素符号后标以 2, 3, 4, …。例如 40Cr 钢表示平均碳的质量分数为 0.40%, 平均铬的质量分数 < 1.5%; 12CrNi3 钢表示平均碳的质量分数为 0.12%, 铬的质量分数 < 1.5%, 镍的质量分数 3%。若为高级优质合金钢, 则在钢号后加“高”或“A”字, 如 60Si2MnA 或 60 硅 2 锰高。

2. 合金工具钢

这类钢的编号方法基本上与合金结构钢相同, 不同的是前面的数字是 1 位, 表示该钢的平均碳的质量分数的千分之几。当碳的质量分数大于 1.0% 时不标出 (高速钢例外)。例如 9CrSi (9 铬硅) 钢表示平均碳的质量分数 0.9%, 铬、硅的质量分数 < 1.5%。又如 W18Cr4V (钨 18 铬 4 钒) 钢表示钨的质量分数 18%, 铬的质量分数 4%, 钒的质量分数 < 1.5%, 平均碳的质量分数为 0.7~0.8% 的高速钢。

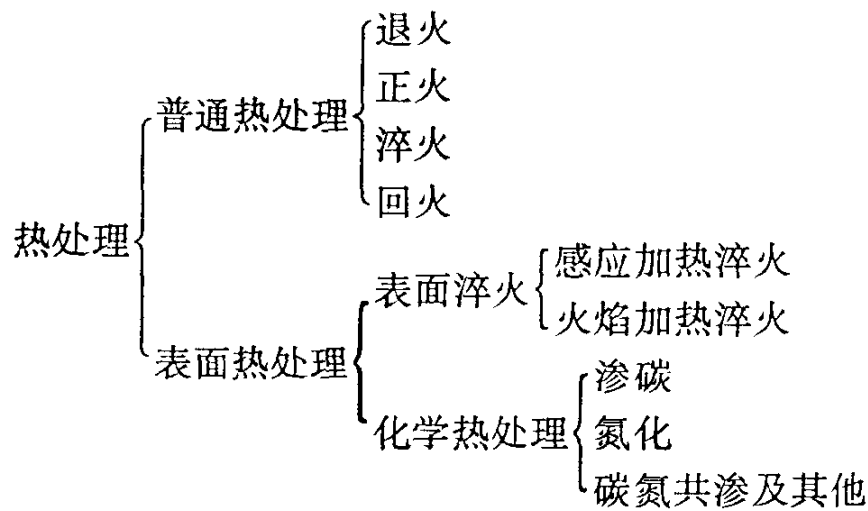
3. 特殊性能合金钢

这类钢具有特殊的化学、物理性能, 常用的有不锈钢, 如 1Cr13; 耐热钢, 如 15CrMo; 耐磨钢, 如 ZGMn13 等。

§ 1-2 钢的热处理

钢的热处理就是将钢在固态下加热到一定的温度, 保温一定的时间, 并以适当的速度冷却, 来改变钢的组织, 得到所需性能的一种工艺方法。通过热处理, 可以提高钢的强度和硬度, 改善钢的塑性和韧度等。因此, 许多重要零件要进行热处理。例如, 机床上有 80% 左右的零件要进行热处理, 刀具、量具和模具全都要进行热处理。

根据加热和冷却方法的不同, 热处理分类如下:



热处理方法很多，但其中的任何一种都是由加热、保温和冷却三个阶段组成的。热处理工艺曲线，如图 1-13 所示。

Fe-Fe₃C 状态图中的 A_1 、 A_3 及 A_{cm} 线是反映不同碳的质量分数的钢在缓慢冷却时的相变温度。在生产中，加热和冷却不能很缓慢，总有不同程度的滞后现象，即加热时实际转变温度高于平衡温度，冷却时实际转变温度又低于平衡温度。随着加热和冷却速度的增加，滞后现象更严重。通常用 A_{cl} 、 A_{c3} 和 A_{cm} 表示加热时滞后的转变温度；用 A_{rl} 、 A_{r3} 和 A_{rcm} 表示冷却时滞后的转变温度，如图 1-14 所示。

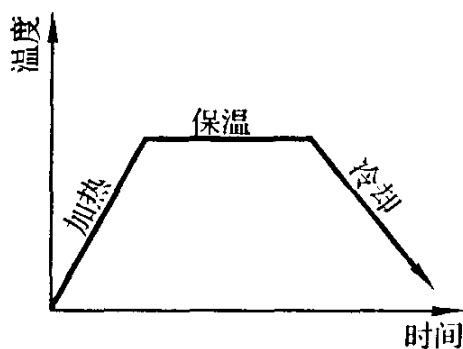


图 1-13 钢的热处理工艺曲线

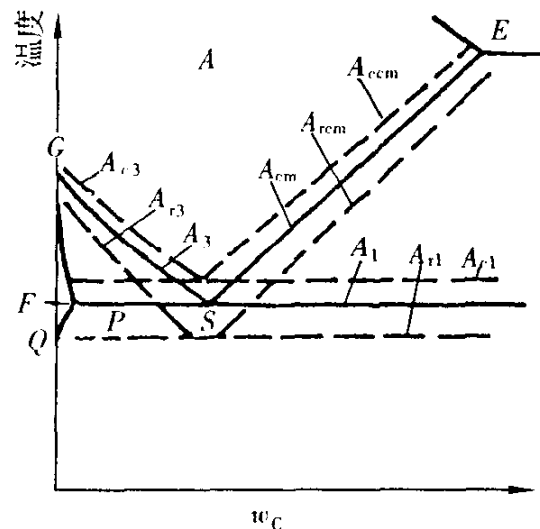


图 1-14 加热和冷却时的相变温度

§ 1-2-1 钢在加热和冷却时的组织转变

一、钢在加热时的组织转变

将共析钢加热到 A_{cl} 时，便发生珠光体向奥氏体的转变。奥氏体的形成过程如图 1-15 所示，由于铁素体碳的质量分数很少，而渗碳体碳的质量分数又很高，所以奥氏体总是在铁素体与渗碳体交界面上成核。形成了的奥氏体晶核一方面不断合并其相邻的铁素体，另一方面渗碳体又不断溶解于奥氏体中，以供给碳，这样，奥氏体晶粒就逐渐增多和长大，以至珠光体全部转变为奥氏体。

当亚共析钢加热至 A_{cl} 以上时，珠光体转变为奥氏体，此时的组织为奥氏体和铁素体。若继续升温，铁素体也逐渐转变为奥氏体，在温度超过 A_{c3} 时，铁素体完全消失，全部组织为细而均匀的单一奥氏体。