

李书常 主编

# 简明 典型金属材料热处理 实用手册

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



# 简明典型金属材料 热处理实用手册

李书常 主编



机械工业出版社

本书介绍了各种常用钢材、粉末冶金材料、有色金属材料的性能和热处理工艺等知识,并对热处理常用设备,热处理质量、安全和节能等知识进行了阐述。通过对渗碳钢、调质钢、弹簧钢、轴承钢、刀具钢、超高强度钢、不锈钢、耐热钢、耐磨钢,以及粉末冶金材料、磁性材料、有色金属材料、铸铁等的分章分类介绍,为广大读者提供了“一看就会,一读就懂,谁看都通”的内容。本书打破常规的金属材料及热处理专业的图书结构,信息量丰富,可满足“拿来就用,立竿见影”的要求。

本书主要适用于从事金属材料、热处理工作的工程技术人员、操作人员、管理人员,也可供材料工程类专业大中专学生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

简明典型金属材料热处理实用手册/李书常主编. —北京:机械工业出版社, 2010. 6

ISBN 978-7-111-30737-2

I. ①简… II. ①李… III. ①金属材料—手册②热处理—手册  
IV. ①TG1-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 097106 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:孔劲 责任编辑:白刚

版式设计:张世琴 责任校对:李秋荣

封面设计:姚毅 责任印制

印刷厂印刷

2010 年\* 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·23.75 印张·461 千字

0 001—&" "册

标准书号:ISBN 978-7-111-30737-2

定价:&Z"元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

现阶段，大量产品离不开金属材料，相当一部分由金属材料制成的重要、关键的零部件更是离不开各种热处理工艺。本书介绍了各种常用钢材、粉末冶金、有色金属材料的性能和热处理等知识，并对热处理工艺过程、热处理常用设备、热处理质量、安全和节能等内容进行了详细阐述，旨在为广大工程技术人员介绍金属材料和热处理工艺性能及其应用状况，为机械、材料成形、交通运输、建筑、汽车、航空航天和国防等行业提供技术支持。

本书从实际应用的角度，介绍了近年来金属材料热处理行业的新技术、新工艺和新方法。全书打破了常规金属材料及热处理图书的编写习惯，按照渗碳钢、调质钢、弹簧钢、轴承钢、刀具钢、超高强度钢、不锈钢耐酸钢、耐热钢、耐磨钢，以及粉末冶金材料、磁性材料、有色金属材料、铸铁等的分章分类方式为广大读者提供了“一看就会，一读就懂，谁看都通”的内容。

本书适合从事金属材料及其热处理工作的工程技术人员、操作人员、管理人员使用，也可供需要选用各种钢铁产品的设计师、工时定额员、材料核算员、材料采购员、物流师等参考。

本书由李书常担任主编，并负责统稿，绪论及第1章~第13章由李书常编写，第14章、第23章~第30章由李飞舟编写，第15章由索建莉编写，第16章~第21章由王伟中编写，第22章由王升绪编写。

# 目 录

前言	
绪论	1
第1章 铁碳合金	3
1.1 铁碳相图	3
1.2 过冷奥氏体转变图	8
1.3 几种金相组织及其应用	13
1.4 铁碳相图的应用	19
第2章 钢的普通热处理	21
2.1 退火工艺	22
2.2 正火工艺	24
2.3 淬火工艺	26
2.4 回火工艺	34
2.5 “四把火”的关系	38
第3章 工程结构钢	39
3.1 钢中元素对碳素结构钢的影响	39
3.2 碳素结构钢	45
3.3 合金结构钢	47
3.4 碳素铸钢和合金铸钢	55
第4章 调质钢	57
4.1 常用调质钢	57
4.2 调质钢的热处理	63
第5章 渗碳钢	66
5.1 渗碳钢的分类、工作条件及性能要求	66
5.2 常用渗碳钢	66
5.3 渗碳钢的热处理	71
第6章 弹簧钢	74
6.1 弹簧用钢	74
6.2 弹簧钢的热处理	80
第7章 轴承钢	88
7.1 滚动轴承与滚动轴承钢	88
7.2 滚动轴承钢的热处理	90
7.3 渗碳轴承钢及其零件的热处理	92
第8章 超高强度钢和其他合金结构钢	97
8.1 超高强度钢	97
8.2 低碳马氏体钢	106
8.3 低淬透性钢	107
第9章 刀具钢	110
9.1 刀具钢的工作条件及使用性能	110
9.2 刀具钢的性能要求	111
第10章 模具用钢	115
10.1 冷作模具钢	115
10.2 热作模具钢	118
10.3 塑料模具用钢	120
10.4 其他冷作模具材料	124
第11章 量具用钢	131
11.1 量具用钢概述	131
11.2 量具用钢的热处理	132
第12章 高速钢	135
12.1 高速钢概述	135
12.2 高速钢的性能及热处理	139
第13章 硬质合金与钢结硬质合金	146
13.1 硬质合金	146
13.2 钢结硬质合金	147
第14章 不锈钢	155
14.1 金属腐蚀机理	155
14.2 不锈钢及其热处理	156
第15章 耐热钢	160
15.1 抗氧化钢	160

15.2 热强钢及其热处理 .....	162	24.1 形变热处理的分类及 用途 .....	254
<b>第 16 章 耐磨钢</b> .....	167	24.2 高温形变热处理 .....	259
16.1 高锰钢 .....	167	24.3 亚温形变淬火 .....	266
16.2 高锰钢的热处理 .....	168	24.4 低温形变热处理 .....	267
<b>第 17 章 粉末冶金材料</b> .....	170	<b>第 25 章 真空热处理</b> .....	271
17.1 粉末冶金材料简介 .....	170	25.1 真空热处理的特点 .....	271
17.2 粉末冶金高速钢 .....	172	25.2 真空热处理炉的特点 .....	272
17.3 粉末冶金模具钢 .....	175	25.3 真空热处理工艺 .....	273
<b>第 18 章 磁性材料及其热 处理</b> .....	176	25.4 模具的真空热处理 .....	280
18.1 软磁材料 .....	177	<b>第 26 章 钢的化学热处理</b> .....	281
18.2 永磁材料 .....	193	26.1 渗碳 .....	282
<b>第 19 章 有色金属及其热 处理</b> .....	199	26.2 渗氮 .....	285
19.1 铝及其合金 .....	199	26.3 碳氮共渗 .....	288
19.2 铜及其合金 .....	207	26.4 渗硼 .....	290
19.3 钛及其合金 .....	216	26.5 渗硫 .....	293
<b>第 20 章 铸铁的热处理</b> .....	219	26.6 渗金属 .....	294
20.1 铸铁的石墨化 .....	219	<b>第 27 章 发蓝与磷化处理</b> .....	297
20.2 常用铸铁的牌号、组织与 性能 .....	222	27.1 发蓝处理 .....	297
20.3 铸铁的热处理 .....	230	27.2 磷化处理 .....	303
<b>第 21 章 感应淬火</b> .....	236	<b>第 28 章 工程材料的选用</b> .....	309
21.1 概述 .....	236	28.1 机械工程材料热处理工艺性 试验 .....	309
21.2 感应淬火工艺 .....	237	28.2 热处理工艺缺陷与零件 结构 .....	310
21.3 感应器设计简介 .....	240	28.3 零件的失效形式与提高材料 性能的途径 .....	313
<b>第 22 章 火焰淬火和电解液 淬火</b> .....	242	28.4 工程材料的强度与强韧化 .....	318
22.1 火焰淬火的优缺点及火焰 特性 .....	242	28.5 零件选材的一般原则和 方法 .....	320
22.2 火焰淬火方法 .....	243	28.6 典型零件的选材及应用 实例 .....	324
22.3 电解液淬火 .....	246	<b>第 29 章 热处理设备</b> .....	328
<b>第 23 章 激光表面强化</b> .....	247	29.1 电阻炉 .....	328
23.1 激光表面强化技术 .....	247	29.2 盐浴炉 .....	335
23.2 激光表面强化的特点和 应用 .....	252	29.3 渗碳炉 .....	338
<b>第 24 章 形变热处理</b> .....	254	29.4 渗氮炉 .....	339
		29.5 其他热处理设备 .....	340

**第 30 章 热处理质量、安全与节能** ..... 348

30.1 热处理质量检验的内容和方法 ..... 348

30.2 材料冶金质量对热处理性能的影响 ..... 353

30.3 原材料的进厂检验 ..... 354

30.4 热处理安全技术 ..... 354

30.5 热处理节能 ..... 364

**附录** ..... 367

**参考文献** ..... 371

# 绪 论

在当今社会生产中，金属材料的应用是十分广泛的，尤其是钢铁材料，在工业、农业、交通运输、建筑以及国防等各方面都离不开它。随着现代化工农业及科学技术的发展，人们对金属材料的性能要求越来越高。为此一般可以采取研制新材料和对金属材料进行热处理这两种方法，后者是最广泛、最常用的方法。热处理是一种综合工艺技术，热处理工艺学是研究这种综合工艺技术原理及规律的一门学科。

金属热处理是机械制造中的重要工艺之一，与其他加工工艺相比，热处理过程一般不改变工件的形状和整体的化学成分，而是通过改变工件内部的显微组织，或改变工件表面的化学成分，赋予或改善工件的使用性能，其特点是改善工件的内在质量，而这是一般肉眼所无法看到的。

热处理工艺在我国已有悠久的历史，早在商代就已经有了经过再结晶退火的金箔饰物，在洛阳出土的战国时代的铁铤，系由白口铁脱碳退火制成。在战国时代燕都遗址出土的大量兵器，向人们展示了在当时钢件已经采用了淬火、正火、渗碳等工艺。近代出土的秦兵马俑佩带的长剑、箭镞等都有力地证明当时已经出现铜合金的复合材料，而且还掌握了精湛的表面保护处理方法，从而保持逾千年不锈。

在从石器时代进展到铜器时代和铁器时代的过程中，热处理的作用逐渐为人们所认识。早在公元前 770 ~ 前 222 年，中国人在生产实践中就已发现，钢铁的性能会因温度和加压变形的影响而变化。白口铸铁的柔化处理就是制造农具的重要工艺。

公元前六世纪，钢铁兵器逐渐被采用，为了提高钢的硬度，淬火工艺遂得到迅速发展。中国河北省易县燕下都出土的两把剑和一把戟，其显微组织中都有马氏体存在，说明是经过淬火的。

随着淬火技术的发展，人们逐渐发现冷却剂对淬火质量的影响。三国蜀人蒲元曾在今陕西斜谷为诸葛亮打制 3000 把刀，相传是派人到成都取水淬火的。这说明中国古代就注意到不同水质的冷却能力了，同时也注意了油和尿的冷却能力。中国出土的西汉（公元前 206 ~ 公元 24 年）中山靖王墓中的宝剑，心部碳的质量分数为 0.15% ~ 0.4%，而表面碳的质量分数却达 0.6% 以上，说明已应用了渗碳工艺。但当时作为个人“手艺”的秘密，不肯外传，因而发展很慢。

热处理工艺最早的史料记载见于《汉书·王褒传》中，我国明代科学家宋

应星在《天工开物》一书中对热处理工艺已有记载。大量事实证明，我国曾是世界上发展和应用热处理技术最早的国家之一，但是长期的封建统治，阻碍了我国科学技术的进步，在相当长的时间内，我国热处理技术的发展处于停止状态，有的技术甚至失传。直至解放以后热处理技术在我国才重新迅速发展起来，出现了许多新工艺、新设备。但和当代世界先进水平比较，我国的热处理技术仍较落后。

1863年，英国金相学家和地质学家展示了钢铁在显微镜下的六种不同的金相组织，证明了钢在加热和冷却时，内部会发生组织改变，钢中高温时的相在急冷时转变为一种较硬的相。法国人奥斯蒙德确立的铁的同素异构理论，以及英国人奥斯汀最早制定的铁碳相图，为现代热处理工艺初步奠定了理论基础。与此同时，人们还研究了在金属热处理的加热过程中对金属的保护方法，以避免加热过程中金属的氧化和脱碳等。

1850~1880年，对于应用各种气体（如氢气、煤气、一氧化碳等）进行保护加热曾有一系列专利。1889~1890年英国人莱克获得多种金属光亮热处理的专利。

20世纪以来，金属物理的发展和其他新技术的移植应用，使金属热处理工艺得到更大发展。一个显著的进展是1901~1925年，在工业生产中应用转筒炉进行气体渗碳；1930年代出现露点电位差计，使炉内气氛的碳势达到可控，以后又研究出用二氧化碳红外仪、氧探头等进一步控制炉内气氛碳势的方法；20世纪60年代，热处理技术运用了等离子场的作用，发展了离子渗氮、渗碳工艺；激光、电子束技术的应用，又使金属获得了新的表面热处理和化学热处理方法。

# 第1章 铁碳合金

## 1.1 铁碳相图

### 1.1.1 金属材料的力学性能

金属材料的性能一般分为工艺性能和使用性能两大类。所谓工艺性能是指机械零件在加工制造过程中，金属材料在所处的冷、热加工条件下表现出来的性能。金属材料工艺性能的好坏，决定了它在制造过程中加工成形的适应能力。由于加工条件不同，要求的工艺性能也就不同，如铸造性能、焊接性、可锻性、热处理性能、切削加工性等；所谓使用性能是指机械零件在使用条件下，金属材料表现出来的性能，它包括力学性能、物理性能、化学性能等。金属材料使用性能的好坏，决定了它的使用范围与使用寿命。

在机械制造业中，一般机械零件都是在常温、常压和非强烈腐蚀性介质中使用的，且在使用过程中各机械零件都将承受不同载荷的作用。金属材料在载荷作用下抵抗破坏的性能，称为力学性能。金属材料的力学性能是零件设计和选材时的主要依据。外加载荷性质不同（例如拉伸、压缩、扭转、冲击、循环载荷等），对金属材料要求的力学性能也将不同。常用的力学性能包括：强度、塑性、硬度、韧性、多次冲击抗力和疲劳极限等。

#### 1. 强度

强度是指金属材料在静荷作用下抵抗破坏（过量塑性变形或断裂）的性能。由于载荷的作用方式有拉伸、压缩、弯曲、剪切等形式，所以强度也分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度等。各种强度间常有一定的联系，使用中一般较多以抗拉强度作为最基本的强度指标。

#### 2. 塑性

塑性是指金属材料在载荷作用下，产生塑性变形（永久变形）而不破坏的能力。

#### 3. 硬度

硬度是衡量金属材料软硬程度的指标。目前生产中测定硬度最常用的是压入硬度法，它是用一定几何形状的压头在一定载荷下压入被测试的金属材料表面，根据被压入程度来测定其硬度值。

常用的方法有布氏硬度（HBW）、洛氏硬度（HRA、HRB、HRC）和维氏

硬度 (HV) 等方法。

#### 4. 疲劳

前面所讨论的强度、塑性、硬度都是金属在静载荷作用下的力学性能指标。实际上,许多机器零件都是在循环载荷下工作的,在这种条件下零件会产生疲劳(疲劳断裂)。

#### 5. 冲击韧度

以很大速度作用于机件上的载荷称为冲击载荷,金属在冲击载荷作用下抵抗破坏的能力叫做冲击韧度。

### 1.1.2 铁碳相图

纯铁中铁的质量分数在 99.8% ~ 99.9%, 在 1538℃ 结晶为  $\delta$ -Fe, 晶格为体心立方, 在 1394℃ 时晶体结构发生转变, 变为  $\gamma$ -Fe, 晶格为面心立方, 在 912℃ 时再次发生转变, 变为  $\alpha$ -Fe, 晶格为体心立方, 这是铁的三种同素异晶状态。这种固态下的同素异晶转变称之为重结晶, 它与钢的合金化与热处理有密切关系。

碳可以溶于  $\gamma$ -Fe 和  $\alpha$ -Fe 中, 以间隙原子的形式存在。在 1394℃ 时, 碳溶于  $\gamma$ -Fe, 称为奥氏体, 这时碳一般存在于面心立方的 8 面体空隙中; 在 912℃ 时, 碳溶于  $\alpha$ -Fe, 称为铁素体, 碳存在于体心立方的 8 面体空隙中。其实碳也能溶于  $\delta$ -Fe, 碳的质量分数为 0.09%。

纯铁的塑性和韧性很好, 但是强度太低, 所以工业上一般都是采用铁碳合金。碳可以溶于铁中, 但是容量有限, 于是剩下的碳以两种形式存在: 一种形式是与铁的间隙化合物  $\text{Fe}_3\text{C}$ , 称为渗碳体; 一种是石墨。

铁碳合金是现代工业中应用最广泛的金属材料。不同成分的铁碳合金, 在不同温度下具有不同的组织, 因而表现出不同的性能。为了解铁碳合金成分、组织和性能之间的关系, 我们需要认识 Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  相图。

#### 1. 铁碳相图

铁碳相图是表示在平衡条件(加热或冷却过程均极其缓慢)下, 铁碳合金系的成分、温度和组织三者间关系的图形。因实际可用铁碳合金的  $w(\text{C}) < 6.69\%$ , 并可渗碳体 [ $w(\text{C}) = 6.69\%$ , 且为稳定的金属化合物] 视为组元, 故对铁碳相图只需研究  $w(\text{C}) = 0\% \sim 6.69\%$  的部分, 即 Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  相图, 如图 1-1 所示。

相图的纵坐标表示温度, 横坐标表示成分; 图中各区域分别表示在相应的成分、温度条件下, 铁碳合金所处的组织状态。

由图 1-1 我们可以看到碳的质量分数最高可以到 6.69%, 处于 ABCD 连线以上的部分为液相区, AHJECF 连线以下为固相区, HJB 线这一段发生了包晶转



断升高。 $PQ$  线，碳在  $\alpha$  相中的溶解度线，道理同  $ES$  线，当碳的质量分数在  $0\% \sim 0.0218\%$  不断升高时，析出  $Fe_3C$  的温度不断升高。

通常按照会不会发生共晶转变来区分碳钢和铸铁，由相图我们可以看到，碳的质量分数小于  $2.11\%$  时不发生共晶转变，那么碳质量分数小于  $2.11\%$  的合金称为碳钢，大于的称为铸铁。根据相图，我们把铁碳合金按照碳的质量分数划分为 7 种类型：小于  $0.0218\%$  为工业纯铁， $0.77\%$  为共析钢， $0.0218\% \sim 0.77\%$  为亚共析钢， $0.77\% \sim 2.11\%$  为过共析钢， $4.30\%$  为共晶白口铸铁， $2.11\% \sim 4.30\%$  为亚共晶白口铸铁， $4.30\% \sim 6.69\%$  为过共晶白口铸铁。

## 2. 铁碳合金的基本相

在铁碳合金中，碳能分别溶入  $\alpha$ -Fe 和  $\gamma$ -Fe 的晶格中而形成两种固溶体。当铁碳合金的碳质量分数超过固溶体的溶解度时，多余的碳与铁形成金属化合物  $Fe_3C$ 。因此，铁碳合金有三种基本相：铁素体、奥氏体和渗碳体。

(1) 铁素体 碳溶入体心立方晶格的  $\alpha$ -Fe 中形成的间隙固溶体（图 1-2）称为铁素体（符号为 F），其显微组织如图 1-3 所示。

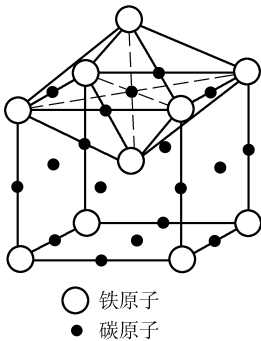


图 1-2 铁素体晶体结构示意图

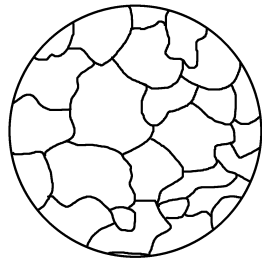
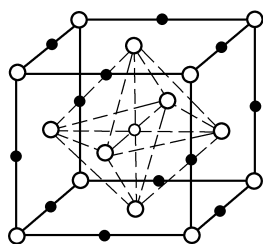


图 1-3 铁素体显微组织示意图

由于体心立方晶格的空隙多而分散，每一个空隙容积很小，故铁素体的溶碳能力弱。在  $727^\circ\text{C}$  时，碳在铁素体中的最大溶解度为  $w(C) = 0.02\%$ ，随温度下降，其溶解度降低， $600^\circ\text{C}$  时，降至  $w(C) = 0.008\%$ 。铁素体的性能近似于纯铁，即强度、硬度低，而塑性、韧性好（ $\sigma_b = 180 \sim 230\text{MPa}$ ， $80\text{HBW}$ ， $\delta = 40\%$ ， $A_k \approx 140\text{J}$ ）。铁素体在  $768^\circ\text{C}$  以下呈铁磁性。

(2) 奥氏体 碳溶入面心立方晶格的  $\gamma$ -Fe 中形成的固溶体（图 1-4）称为奥氏体（符号为 A），其显微组织如图 1-5 所示。

由于面心立方晶格的空隙少而集中，每一个空隙容积较大，故奥氏体的溶碳能力较强。在  $1148^\circ\text{C}$  时，碳在奥氏体中的最大溶解度达  $w(C) = 2.11\%$ ，而在  $727^\circ\text{C}$  时降至  $w(C) = 0.77\%$ 。奥氏体的强度、硬度不高，但塑性、韧性很



○ 铁原子  
● 碳原子

图 1-4 奥氏体晶体结构示意图

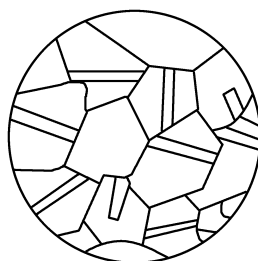


图 1-5 奥氏体显微组织示意图

好 ( $\sigma_b \approx 400\text{MPa}$ ,  $160 \sim 200\text{HBW}$ ,  $\delta = 40\% \sim 50\%$ ), 奥氏体呈非铁磁性。

(3) 渗碳体 铁与碳形成的金属化合物  $\text{Fe}_3\text{C}$  称为渗碳体。渗碳体的成分固定不变 [ $w(\text{C}) = 6.69\%$ ], 硬度很高 ( $860\text{HV}$ ), 但塑性、韧性极差 ( $\delta \approx 0$ ,  $A_k \approx 0$ )。

铁碳合金的室温组织, 一般是在铁素体基体上分布着片状、粒状或网状渗碳体。由于渗碳体在合金中起第二相强化作用, 故随碳的质量分数增高, 铁碳合金中的渗碳体增多, 而使其硬度强度增高、塑性韧性下降。当碳的质量分数高达  $6.69\%$  时, 铁碳合金的组织全部为硬而脆的渗碳体而无法使用。此外, 渗碳体的大小、形状和分布对铁碳合金的性能也有很大的影响。

### 1.1.3 碳的质量分数对合金性能的影响

按照碳的质量分数不同, 室温时的合金组织可分为 7 种类型。

当碳的质量分数小于  $0.0218\%$  时为工业纯铁, 由相图可以得知, 在金属液冷却到室温时, 合金为铁素体和三次渗碳体。

当碳的质量分数为  $0.77\%$  时为共析钢, 在金属液冷却到室温时, 合金的组织是珠光体, 珠光体是铁素体和  $\text{Fe}_3\text{C}$  的机械混合物。工业纯铁的组织是铁素体和三次渗碳体, 三次渗碳体是由于碳在  $\alpha\text{-Fe}$  中的浓度饱和, 从铁素体中析出的  $\text{Fe}_3\text{C}$ , 而珠光体则是铁素体和  $\text{Fe}_3\text{C}$  的机械混合物, 是通过奥氏体的共析转变得到的, 机械混合物的浓度比例是一定的。

当碳的质量分数在  $0.0218\% \sim 0.77\%$  之间时, 为亚共析钢, 在金属液冷却到室温时, 合金的组织是珠光体 + 铁素体, 并且亚共析钢中的碳质量分数越高, 室温组织中的珠光体越多。

过共析钢的碳质量分数在  $0.77\% \sim 2.11\%$ , 在金属液冷却到室温时, 合金的组织为珠光体 + 二次渗碳体, 并且碳的质量分数越高, 得到的二次渗碳体量越大。

当碳的质量分数为 4.30% 时，为共晶白口铸铁，合金的室温组织比较复杂一点，因为在冷却到 1148℃ 时，发生共晶转变得得到莱氏体（铁素体和  $\text{Fe}_3\text{C}$  的机械混合物），在这个温度以下后，由于浓度饱和和铁素体中析出二次渗碳体，在冷却到 727℃ 时，奥氏体发生共析转变得得到珠光体，那么实际上得到的就是珠光体 + 二次渗碳体 + 莱氏体中剩下的  $\text{Fe}_3\text{C}$ ，这种室温组织保留了高温共晶转变产物莱氏体的形态特征，但是组成相的奥氏体已经发生了转变，故称为变态莱氏体。

亚共晶白口铸铁的碳质量分数为 2.11% ~ 4.30%，当金属液冷却到室温时，合金的室温组织为变态莱氏体 + 珠光体 + 二次渗碳体。

过共晶白口铸铁的碳质量分数在 4.30% ~ 6.69%，当金属液冷却到室温时，合金的室温组织为变态莱氏体 + 一次渗碳体。

我们可以看到，随着碳质量分数的升高， $\text{Fe}_3\text{C}$  的含量在升高，存在形态也在发生变化，最开始存在于铁素体基体内，然后存在于奥氏体晶界上，最后作为基体存在，可见不同碳的质量分数，合金的组织是不一样的，这也是造成性能不同的根本原因。铁素体是软韧相而  $\text{Fe}_3\text{C}$  是硬脆相，当铁素体为基体时， $\text{Fe}_3\text{C}$  越多，分布越均匀，那么材质的硬度越高，但是如果  $\text{Fe}_3\text{C}$  分部在晶界上甚至作为基体出现时，材质的塑性和韧性会大大降低。

## 1.2 过冷奥氏体转变图

根据铁碳相图，共析钢加热到超过  $A_1$  温度时，全部转变为奥氏体；而亚共析钢和过共析钢必须加热到  $A_3$  和  $A_{cm}$  以上才能获得单相奥氏体。在实际热处理加热条件下，相变是在不平衡条件下进行的，其相变点与相图中的相变温度有一些差异。由于过热和过冷现象的影响，加热时相变温度偏向高温，冷却时偏向低温，这种现象称为滞后。加热或冷却速度越快，则滞后现象越严重。图 1-6 表示加热和冷却速度对碳钢临界温度的影响。通常把加热时的实际临界温度标以字母“c”，如  $A_{c1}$ 、 $A_{c3}$ 、 $A_{cm}$ ；而把冷却时的实际临界温度标以字母“r”，如  $A_{r1}$ 、 $A_{r3}$ 、 $A_{r_{cm}}$  等。

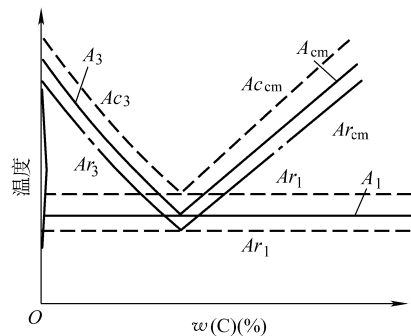


图 1-6 加热和冷却速度对钢临界温度的影响

### 1.2.1 钢在加热时的转变

多数情况下，钢的热处理需要先加热得到奥氏体，然后以不同速度冷却使

奥氏体转变为不同的组织，得到钢的不同性能。因此掌握热处理规律，首先要研究钢在加热时的变化。

### 1. 加热时奥氏体的形成过程

(1) 共析钢的加热转变 从铁碳相图中看到，钢加热到  $727^{\circ}\text{C}$ （铁碳相图的  $PSK$  线，又称  $A_1$  温度）以上的温度珠光体转变为奥氏体。这个加热速度十分缓慢，实际热处理的加热速度均高于这个缓慢加热速度，实际珠光体转变为奥氏体的温度高于  $A_1$ ，定义实际转变温度为  $Ac_1$ 。 $Ac_1$  高于  $A_1$ ，表明出现热滞后，加热速度越快， $Ac_1$  越高，同时完成珠光体向奥氏体转变的时间也越短。

共析碳钢（含  $0.77\% \text{C}$ ）加热前为珠光体组织，一般为铁素体与渗碳体相间排列的层片状组织，加热过程中奥氏体转变过程可分为四步进行，如图 1-7 所示。

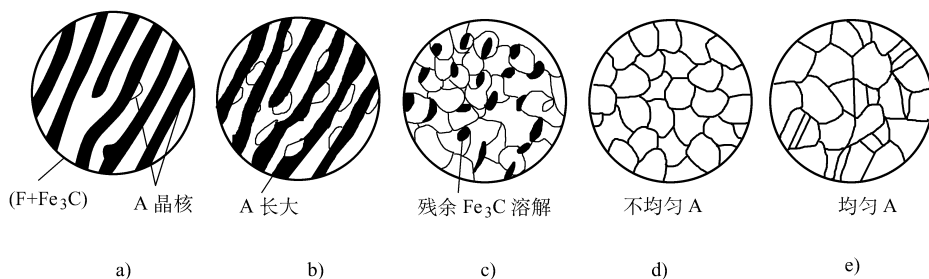


图 1-7 珠光体向奥氏体转变示意图

第一阶段：奥氏体晶核的形成。由  $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$  状态图知：在  $A_1$  温度铁素体含约  $0.0218\% \text{C}$ ，渗碳体含  $6.69\% \text{C}$ ，奥氏体含  $0.77\% \text{C}$ 。在珠光体转变为奥氏体过程中，原铁素体由体心立方晶格改组为奥氏体的面心立方晶格，原渗碳体由复杂斜方晶格转变为面心立方晶格。所以，钢的加热转变既有碳原子的扩散，也有晶体结构的变化。基于能量与成分条件，奥氏体晶核在珠光体的铁素体与渗碳体两相交界面处产生（图 1-7a），这两相交界面越多，奥氏体晶核越多。

第二阶段：奥氏体的长大（图 1-7b）。奥氏体晶核形成后，它的一侧与渗碳体相接，另一侧与铁素体相接。随着铁素体的转变（铁素体区域的缩小），以及渗碳体的溶解（渗碳体区域缩小），奥氏体不断向其两侧的原铁素体区域及渗碳体区域扩展长大，直至铁素体完全消失，奥氏体彼此相遇，形成一个个奥氏体晶粒。

第三阶段：残余渗碳体的溶解（图 1-7c）。由于铁素体转变为奥氏体的速度远高于渗碳体的溶解速度，在铁素体完全转变之后尚有不少未溶解的“残余渗碳体”存在，还需一定时间保温，让渗碳体全部溶解。

第四阶段：奥氏体成分的均匀化。即使渗碳体全部溶解，奥氏体内的成分仍不均匀（图 1-7d），在原铁素体区域形成的奥氏体碳的质量分数偏低，在原渗碳体区域形成的奥氏体碳的质量分数偏高，还需保温足够时间，让碳原子充分扩散，奥氏体成分才可能均匀（图 1-7e）。

珠光体转变为奥氏体并使奥氏体成分均匀必须有两个必要而充分的条件：一是温度条件，要在  $A_{c1}$  以上加热；二是时间条件，要求在  $A_{c1}$  以上温度保持足够时间。在一定加热速度条件下，超过  $A_{c1}$  的温度越高，奥氏体的形成与成分均匀化需要的时间越短；在一定的温度（高于  $A_{c1}$ ）条件下，保温时间越长，奥氏体成分越均匀。还要看到奥氏体晶粒由小尺寸变为大尺寸是一个自发过程，在  $A_{c1}$  以上的一定加热温度下，过长的保温时间会导致奥氏体晶粒的合并，尺寸变大。相对之下，相同时间加热，高的加热温度导致奥氏体晶粒尺寸的增大倾向明显大于低加热温度的奥氏体晶粒长大倾向。奥氏体晶粒尺寸过大（或过粗）往往导致热处理后钢的强度降低，工程上往往希望得到细小而成分均匀的奥氏体晶粒，为此可以采用：途径之一是在保证奥氏成分均匀情况下选择尽量低的奥氏体化温度；途径之二是快速加热到较高的温度经短暂保温使形成的奥氏体来不及长大而冷却得到细小的晶粒。

工程上把奥氏体晶粒尺寸大小定义为晶粒度，并分为 8 级，其中 1~4 级为粗晶粒，5 级以上为细晶粒，超过 8 级为超细晶粒。

(2) 非共析钢的加热转变 亚共析钢与过共析钢珠光体加热转变为奥氏体的过程与共析钢转变过程是一样的，即在  $A_{c1}$  温度以上加热无论亚共析钢或是过共析钢中的珠光体均要转变为奥氏体。不同的是还有亚共析钢的铁素体的转变与过共析钢的二次渗碳体的溶解。更重要的是铁素体的完全转变要在  $A_3$  温度（Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图的 GS 线）以上，考虑热滞后实际要在  $A_{c3}$  以上，二次渗碳体的完全溶解要在温度  $A_{cm}$ （Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图的 ES 线）以上，考虑热滞后要在  $A_{cm}$  以上。即亚共析钢加热后组织全为奥氏体需在  $A_{c3}$  以上，对过共析钢要在  $A_{cm}$  以上。如果亚共析钢仍仅在  $A_{c1}$  ~  $A_{c3}$  温度之间加热，无论加热时间多长加热后的组织仍为铁素体与奥氏体共存。对过共析钢在  $A_{c1}$  ~  $A_{cm}$  温度之间加热，加热后的组织应为二次渗碳体与奥氏体共存。加热后冷却过程的组织转变也仅是奥氏体向其他组织的转变，其中的铁素体及二次渗碳体在冷却过程中不会发生转变。

## 2. 钢的加热工艺选择

钢的加热工艺包含加热温度与加热时间。

加热温度的选择，原则上可根据钢的相图参考确定。实际生产中还要考虑加热方式、不同热处理类型以及钢的具体成分等因素作必要调整。

加热时间指的是升温与保温时间的总和。加热工件到要求的温度（实为零件表面温度）所需时间为升温时间。保温时间是工件表面与心部都达到要求温