

高职高专“十二五”规划教材

机械工程材料

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 主 编 | 周超梅 | 王淑君 | | |
| 副主编 | 吉 宁 | 殷秋菊 | 高绍艳 | 李云璐 |
| 参 编 | 王宏伟 | 刘丽华 | 柳 艳 | 杨 磊 |
| | 石未华 | 李桐顺 | 王佳智 | 周 姝 |
| 主 审 | 刘玉娟 | 于 军 | | |



机械工业出版社

本书是依据“必需、够用和少而精”的原则编写的，是高职高专“十二五”规划教材。全书共分三篇，第一篇（前七章）为金属材料部分，第二篇（第八章至第十章）为非金属材料部分，第三篇（第十一章至第十五章）为常用模具材料部分。本书以机械制造生产第一线需要的知识、技能培养为目标，注重实用，重视综合性与实践性，力求反映高职高专课程和教学内容体系的改革方向，有利于学生综合素质、科学思维方式及创新能力的培养。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校和成人高校机械工程类专业及技师培训教材，也可供相关工程技术人员、企业管理人员参考使用。

本书配有电子课件，凡使用本书作为教材的教师可登录机械工业出版社教材服务网 www.cmpedu.com 注册后下载。咨询邮箱：cmpgaozhi@shna.com。咨询电话：010-88379375。

图书在版编目（CIP）数据

机械工程材料/周超梅，王淑君主编. —北京：机械工业出版社，2013.7

高职高专“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-43065-0

I. ①机… II. ①周… ②王… III. ①机械制造材料—高等职业教育—教材 IV. ①TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 136518 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：薛礼 责任编辑：薛礼

版式设计：常天培 责任校对：丁丽丽 肖琳

封面设计：赵颖喆 责任印制：

印刷厂印刷

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·14 印张·342 千字

0001—册

标准书号：ISBN 978-7-111-43065-0

定价：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

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010)68326294


机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010)88379649

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010)88379203

封面无防伪标均为盗版



前言

本书是根据教育部制订的《高职高专教育工程材料类基础课程教学基本要求》，在总结多年的教学改革及生产实践的经验基础上，本着“必需、够用和少而精”的原则编写的。全书共分三篇，第一篇（前七章）为金属材料部分，第二篇（第八章至第十章）为非金属材料部分，第三篇（第十一章至第十五章）为常用模具材料部分。每章均附有小结和复习思考题，力求体现教材的实用性与技能性，使教材能贯通于课堂教学、实训与实践教学的各个环节。本书对部分新材料、新工艺和新技术进行了简要阐述。

本书具有以下主要特点：

1) 教材内容侧重于应用理论、应用技术和材料的选用，对基础理论部分以必需、够用为度。强调理论联系实际，贯穿以应用为中心这一主线，以掌握概念、强化应用为教学重点。

2) 为了便于自学，力求教材内容通俗易懂，图文并茂，深入浅出，重点突出。力求内容简明实用，使学生易于理解，明确重点和难点。

3) 全书的名词、术语、牌号均采用了最新国家标准，使用法定计量单位。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校和成人高校机械工程类专业及技师培训教材，也可供相关工程技术人员、企业管理人员参考使用。各校可根据专业特点、教学时数等具体情况，对内容进行调整或增删。

本书由周超梅、王淑君任主编，吉宁、殷秋菊、高绍艳、李云璐任副主编，参加编写的人员还有王宏伟、刘丽华、柳艳、杨磊、石未华、李桐顺、王佳智、周姝。其中，绪论、第五章、第九章由周超梅编写，第十二章至第十四章由王淑君编写，第三章由吉宁编写，第六章由殷秋菊编写，第七章由高绍艳编写，第四章由华晨宝马汽车有限公司生产部质量控制中心工程师李云璐编写，第一章由王宏伟、杨磊编写，第十章、第十一章由刘丽华、周姝编写，第八章由柳艳编写，第二章由石未华编写，第十五章由李桐顺、王佳智编写，本书由刘玉娟、于军担任主审。

由于编者水平有限，书中难免存在错误及不妥之处，恳请读者不吝批评指正，以便改进提高。



目 录

| | | |
|-----------------------|-----|--|
| 前言 | | |
| 绪论 | 1 | |
| 第一篇 金属材料 | | |
| 第一章 金属材料的性能 | 5 | |
| 第一节 金属材料的使用性能 | 5 | |
| 第二节 金属材料的工艺性能 | 16 | |
| 本章小结 | 16 | |
| 复习思考题 | 16 | |
| 第二章 金属的晶体结构与结晶 | 18 | |
| 第一节 金属的晶体结构 | 18 | |
| 第二节 合金的基本结构 | 22 | |
| 第三节 纯金属的结晶 | 24 | |
| 第四节 合金的结晶 | 27 | |
| 本章小结 | 29 | |
| 复习思考题 | 30 | |
| 第三章 铁碳合金及碳钢 | 31 | |
| 第一节 铁碳合金的组织 | 31 | |
| 第二节 铁碳合金相图 | 33 | |
| 第三节 铁碳合金的分类 | 36 | |
| 第四节 典型铁碳合金的结晶过程 | 36 | |
| 第五节 碳素钢 | 44 | |
| 本章小结 | 50 | |
| 复习思考题 | 50 | |
| 第四章 合金钢 | 51 | |
| 第一节 合金钢的分类及牌号 | 51 | |
| 第二节 合金元素在钢中的主要作用 | 52 | |
| 第三节 合金结构钢 | 54 | |
| 第四节 合金工具钢 | 63 | |
| 第五节 特殊性能钢 | 69 | |
| 本章小结 | 74 | |
| 复习思考题 | 74 | |
| 第五章 钢的热处理 | 76 | |
| 第一节 热处理概述 | 76 | |
| 第二节 钢的退火 | 88 | |
| 第三节 钢的正火 | 89 | |
| 第四节 钢的淬火 | 90 | |
| 第五节 钢的回火 | 95 | |
| 第六节 钢的表面热处理技术 | 99 | |
| 本章小结 | 106 | |
| 复习思考题 | 107 | |
| 第六章 铸铁 | 108 | |
| 第一节 铸铁的分类 | 108 | |
| 第二节 灰铸铁的性能与用途 | 109 | |
| 第三节 可锻铸铁的性能与用途 | 111 | |
| 第四节 球墨铸铁的性能与用途 | 113 | |
| 第五节 蠕墨铸铁的性能与用途 | 115 | |
| 第六节 合金铸铁的性能与用途 | 116 | |
| 本章小结 | 117 | |
| 复习思考题 | 117 | |
| 第七章 有色金属及硬质合金 | 118 | |
| 第一节 铝及铝合金 | 118 | |
| 第二节 铜及铜合金 | 122 | |
| 第三节 钛及钛合金 | 127 | |
| 第四节 滑动轴承合金 | 129 | |
| 第五节 硬质合金 | 132 | |
| 本章小结 | 133 | |
| 复习思考题 | 133 | |

第二篇 非金属材料

| | |
|----------------------------|-----|
| 第八章 高分子材料 | 137 |
| 第一节 塑料 | 137 |
| 第二节 橡胶 | 142 |
| 第三节 胶粘剂 | 144 |
| 第四节 纤维 | 147 |
| 第五节 涂装材料 | 148 |
| 本章小结 | 150 |
| 复习思考题 | 151 |
| 第九章 陶瓷材料 | 152 |
| 第一节 陶瓷 | 152 |
| 第二节 玻璃 | 153 |
| 本章小结 | 155 |
| 复习思考题 | 155 |
| 第十章 复合材料及功能材料 | 156 |
| 第一节 复合材料 | 156 |
| 第二节 功能材料 | 159 |
| 本章小结 | 162 |
| 复习思考题 | 163 |

第三篇 常用模具材料

| | |
|--------------------------|-----|
| 第十一章 模具材料概述 | 167 |
| 第一节 模具材料的分类 | 167 |
| 第二节 模具材料的性能要求 | 167 |
| 本章小结 | 169 |
| 复习思考题 | 170 |
| 第十二章 冷作模具钢 | 171 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| 第一节 冷作模具钢的性能要求及分类 | 171 |
| 第二节 冷作模具钢的选用 | 174 |
| 第三节 冷作模具钢的热处理 | 179 |
| 本章小结 | 180 |
| 复习思考题 | 181 |
| 第十三章 热作模具钢 | 182 |
| 第一节 热作模具钢的分类 | 182 |
| 第二节 热作模具钢的性能要求 | 182 |
| 第三节 典型的热作模具用钢 | 183 |
| 第四节 热作模具钢的热处理 | 187 |
| 本章小结 | 188 |
| 复习思考题 | 189 |
| 第十四章 塑料模具钢 | 190 |
| 第一节 塑料模具钢的性能要求 | 190 |
| 第二节 塑料模具用钢 | 192 |
| 第三节 塑料模具钢的选用 | 200 |
| 本章小结 | 201 |
| 复习思考题 | 201 |
| 第十五章 模具表面的处理技术 | 202 |
| 第一节 模具表面处理技术概述 | 202 |
| 第二节 模具表面的涂镀处理技术 | 203 |
| 本章小结 | 211 |
| 复习思考题 | 211 |
| 附录 | 212 |
| 附录 A 压痕直径与布氏硬度对照表 | 212 |
| 附录 B 黑色金属硬度及强度换算表 | 214 |
| 附录 C 常用钢的临界点 | 215 |
| 参考文献 | 216 |

第三章 铁碳合金及碳钢

【基本要求】

1. 掌握铁碳合金的组织、性能及用途。
2. 掌握碳钢的概念、分类、牌号及用途。

【重点和难点】

1. 铁碳合金的基本组织，奥氏体、铁素体、渗碳体、珠光体及莱氏体的碳质量分数。
2. 铁碳合金相图中主要点、线的意义。
3. 共析钢、亚共析钢和过共析钢的结晶过程及室温组织。
4. 碳钢的分类、牌号、性能及应用。

铁碳合金是碳钢和铸铁的统称。碳的质量分数为 0.0218% ~ 2.11% 的铁碳合金称为碳钢，大于 2.11% 的铁碳合金称为铸铁，小于 0.0218% 的称为工业纯铁。纯铁的强度和硬度都很低，在机械制造中很少应用。钢铁是现代机械制造工业中应用最广泛的金属材料，铁与碳是钢铁中两个基本的元素。碳钢与铸铁均为铁碳合金，不同成分的铁碳合金具有不同的组织和性能。

第一节 铁碳合金的组织

一、铁素体

碳溶解在 α -Fe 中形成的间隙固溶体称为铁素体，用符号 F 表示，其晶胞与显微组织如图 3-1 所示，在显微镜下铁素体为均匀明亮的多边形晶粒。由于 α -Fe 是体心立方晶格，晶格间隙较小，碳原子只能处于位错、空位、晶界缺陷处或个别八面体间隙中，所以碳在 α -Fe 中溶解度很低，在 727℃ 时，溶解度最大，碳的质量分数仅为 0.0218%，室温下碳的质量分数为 0.0008%。铁素体的力学性能几乎与纯铁相同，强度和硬度低，而塑性和韧性好。

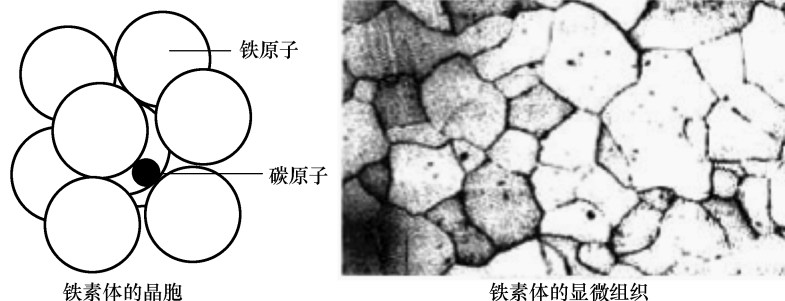


图 3-1 铁素体晶胞与显微组织示意图

二、奥氏体

碳溶解在 γ -Fe 中形成的间隙固溶体称为奥氏体，用符号 A 表示。其晶胞与显微组织如图 3-2 所示，晶粒是多边形，晶界较平直，晶粒内常有孪晶出现。由于 γ -Fe 是面心立方晶格，晶格间的最大间隙要比 α -Fe 大，所以溶碳量较强， γ -Fe 在 1148℃ 时碳的质量分数最大可达 2.11%，在 727℃ 时碳的质量分数最低为 0.77%。奥氏体的硬度为 170 ~ 220HBW，断后伸长率为 40% ~ 50%，所以奥氏体强度、硬度较低，而塑性、韧性较高，适于锻压成形。奥氏体不呈铁磁性。

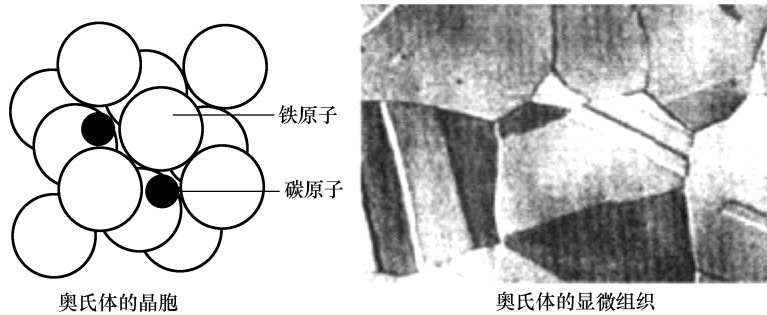


图 3-2 奥氏体晶胞与显微组织示意图

三、渗碳体

渗碳体是碳的质量分数为 6.69% 的铁与碳的金属化合物 (Fe_3C)。渗碳体具有复杂的斜方晶体结构，如图 3-3 所示。渗碳体的熔点为 1227℃ 左右，在 230℃ 以下具有弱铁磁性，在 230℃ 以上铁磁性消失。渗碳体的硬度很高 ($\leq 800\text{HBW}$)，而塑性和韧性几乎等于零，脆性很大，是一种亚稳定相，在一定条件下能分解为铁和石墨，对铸铁具有重要意义。渗碳体显微组织形态很多，在钢和铸铁中与其他相共存时呈片状、粒状、网状或板状。渗碳体的形状、大小及分布对钢和铸铁的力学性能影响很大。

四、珠光体

珠光体是铁素体和渗碳体的混合物，用符号 P 表示，珠光体的碳质量分数为 0.77%，其显微组织如图 3-4 所示。它是渗碳体和铁素体片层相间、交替排列或 Fe_3C 以颗粒状分布

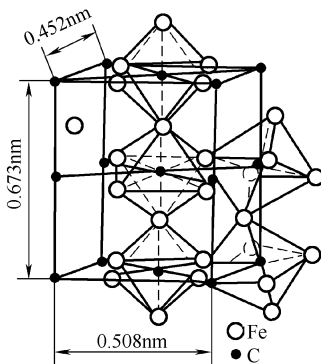


图 3-3 渗碳体的晶胞示意图

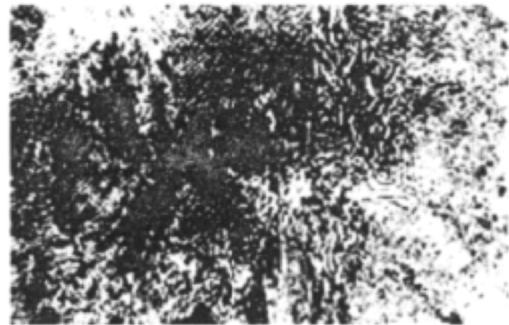


图 3-4 珠光体显微组织图

在铁素体基体上形成的混合物，所以珠光体的性能大体上是铁素体和渗碳体两者性能的平均值。因此，珠光体的强度较高、硬度适中，具备一定的塑性。

五、莱氏体

莱氏体是碳质量分数为 4.3% 的奥氏体和渗碳体组成的两相机械混合物，用符号“Ld”表示，它存在于高温区（727 ~ 1148℃）。在 727℃ 以下时，奥氏体转变为珠光体，此时变成渗碳体和珠光体的混合物，称为低温莱氏体，用符号 L'd 表示。由于莱氏体含有大量的渗碳体，所以莱氏体的力学性能和渗碳体相似，硬度很高，塑性、韧性很低。

铁素体、奥氏体、渗碳体为单相组织，是铁碳合金的基本相，珠光体、莱氏体是由基本相混合组成的多相组织，铁碳合金基本组织的力学性能见表 3-1。

表 3-1 铁碳合金基本组织的力学性能

| 组织名称 | 符号 | w_c (%) | 力学性能 | | |
|------|----------|---------------|------------|---------|------------|
| | | | R_m /MPa | A (%) | 硬度 HBW |
| 铁素体 | F | ≤ 0.0218 | 180 ~ 280 | 30 ~ 50 | 50 ~ 80 |
| 奥氏体 | A | ≤ 2.11 | — | 40 ~ 60 | 120 ~ 220 |
| 渗碳体 | Fe_3C | 6.69 | 30 | 0 | ≤ 800 |
| 珠光体 | P | 0.77 | 800 | 20 ~ 35 | 180 |
| 莱氏体 | L'd (Ld) | 4.30 | — | 0 | > 700 |

第二节 铁碳合金相图

铁碳合金相图是表示在缓慢冷却或缓慢加热的条件下，不同成分的铁碳合金的状态或组织随温度变化的图形，是研究铁碳合金的重要工具。

一、铁碳合金相图的组成

在铁碳合金中，铁和碳可以形成一系列稳定的化合物，如 Fe_3C 、 Fe_2C 、 FeC 等。每一个稳定的化合物都可以成为一个独立的组元，图 3-5 所示为整个铁碳合金相图，它可以分解为 Fe- Fe_3C 、 Fe_3C - Fe_2C 、 Fe_2C - FeC 等一系列铁碳二元合金相图。但是，工业用铁碳合金的碳质量分数一般不超过 5%，因为碳质量分数过高的铁碳合金，脆性很大，难以加工，在生产中无实用意义。因此，对铁碳合金的研究集中在 Fe- Fe_3C ($w_c = 6.69\%$) 相图的研究上，如图 3-6 所示。为了便于学习，将 Fe- Fe_3C 相图左上角部分（实际应用很少）简化，形成如图 3-7 所示的 Fe- Fe_3C 相图。

二、Fe- Fe_3C 相图中的特性点

- (1) A 点 A 点是纯铁的熔点——1538℃。
- (2) D 点 D 点是渗碳体的熔点——1227℃。
- (3) G 点 G 点是铁的同素异构转变点，温度为 912℃。铁在该点发生面心立方晶格与体心立方晶格的相互转变。

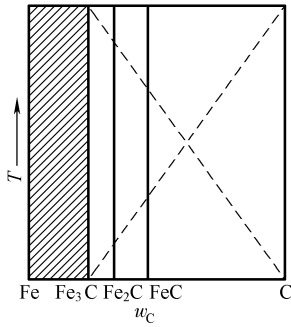


图 3-5 铁碳合金相图的组成

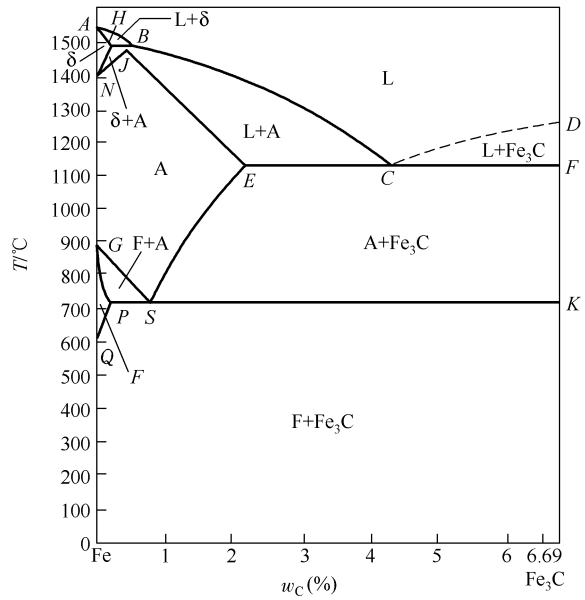


图 3-6 以相组成表示的铁碳合金相图

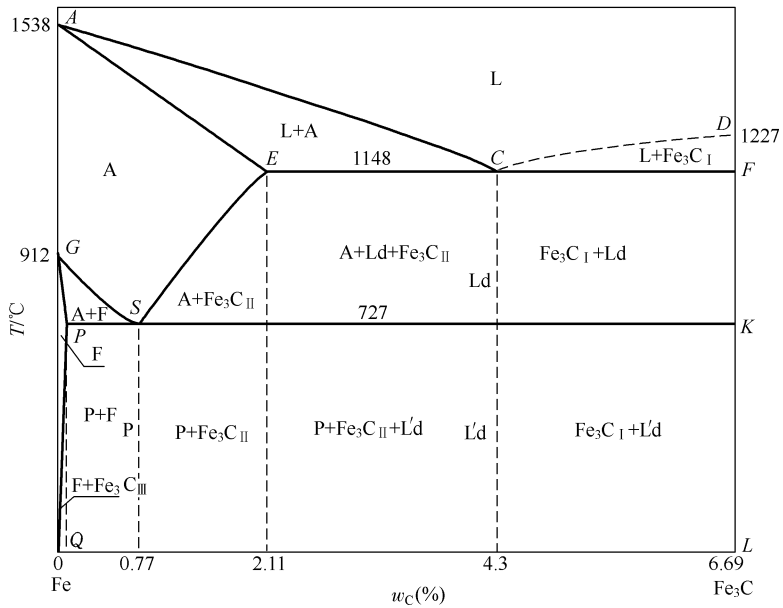
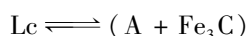


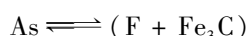
图 3-7 简化后的 Fe-Fe₃C 相图

- (4) E 点 E 点是碳在 γ -Fe 中最大溶解度点, $w_C = 2.11\%$, 温度为 1148°C 。
- (5) P 点 P 点是碳在 α -Fe 中最大溶解度点, $w_C = 0.0218\%$, 温度为 727°C 。
- (6) Q 点 Q 点是室温下碳在 α -Fe 中的溶解度, $w_C = 0.0008\%$ 。
- (7) C 点 C 点为共晶点, 液相在 1148°C 同时结晶出奥氏体和渗碳体, 该转变称为共

晶转变。共晶转变是一定成分的液态金属，在某一恒温下，同时析出两种固相的转变。共晶转变的产物是莱氏体，用符号 L_d 表示。共晶转变的表达式为



(8) S 点 S 点为共析点。奥氏体在 727°C 同时析出铁素体和渗碳体，该转变为共析转变。奥氏体是铁素体和渗碳体的机械混合物，用符号 P 表示。共析转变是一定成分的固溶体，在某一恒温下，同时析出两种固相的转变。共析转变的表达式为



三、Fe-Fe₃C 相图中的特性线

1. ACD 线

ACD 线是液相线，此线以上区域全部为液相，用符号 L 表示，金属液冷却到此线开始结晶，在 AC 线以下从液相中结晶出奥氏体，在 CD 线以下从液相中结晶出渗碳体。

2. AECF 线

$AECF$ 线是固相线，金属液冷却到此线全部结晶为固体，此线以下为固态区。液相线与固相线之间为金属液的结晶区域，这个区域内金属液与固相并存， AEC 区域内为金属液与奥氏体共存区， CDF 区域内为金属液与渗碳体共存区。

3. GS 线

GS 线也叫 A_3 线，它是冷却时从奥氏体中析出铁素体的开始线，或者说在加热过程中，铁素体溶入奥氏体的转变终止线。

4. ES 线

ES 线是碳在奥氏体中的溶解度曲线，也叫 A_{cm} 线，随着温度的降低，碳沿 ES 线从 2.11% 下降至 0.77%。由于奥氏体中碳质量分数的减小，奥氏体中将析出渗碳体，称为二次渗碳体 Fe_3C_{II} ，以区别于从液体中沿 CD 线析出的一次渗碳体 Fe_3C_I 。

5. PQ 线

PQ 线是碳在铁素体中的溶解度曲线，在 727°C 时，碳在铁素体中质量分数最大为 0.0218%，随着温度的降低，在 300°C 以下碳的质量分数小于 0.001%。所以，当铁素体从 727°C 冷却下来时，会从铁素体中析出渗碳体，称为三次渗碳体 Fe_3C_{III} 。因析出量较少，常与共析渗碳体连在一起不易分辨，可忽略不计。

6. ECF 线

ECF 线是共晶线，当金属冷却到此线 (1148°C) 时将发生共晶转变，凡是 $w_c = 2.11\% \sim 6.69\%$ 的铁碳合金都要发生共晶转变，其产物是莱氏体。

7. PSK 线

PSK 线是共析线，当金属冷却到此线 (727°C) 时将发生共析转变，凡是 $w_c = 0.0218\% \sim 6.69\%$ 的铁碳合金都要发生共析转变。共析线也叫 A_1 线，共析转变的产物是珠光体。

四、Fe-Fe₃C 相图中的相区

1. 单相区

Fe-Fe₃C 相图中有四个单相区， ACD 线以上是液相区 (L)； $AESG$ 为奥氏体区 (A)；

$GPQG$ 为铁素体区 (F), $DFKL$ 为渗碳体区 (Fe_3C)。

2. 两相区

$Fe-Fe_3C$ 相图中有五个两相区: $L + A$ 两相区、 $L + Fe_3C$ 两相区、 $A + Fe_3C$ 两相区、 $A + F$ 两相区及 $F + Fe_3C$ 两相区。

第三节 铁碳合金的分类

根据铁碳合金中碳的质量分数及室温平衡组织, 铁碳合金可分为三类。

1. 工业纯铁

碳质量分数 $w_C < 0.0218\%$ 的铁碳合金, 室温平衡组织为铁素体加少量 Fe_3C_{III} 。

2. 钢

碳质量分数 $w_C = 0.0218\% \sim 2.11\%$ 的铁碳合金称为钢。根据碳质量分数及室温平衡组织的不同, 钢又可分为如下三类:

- 1) 亚共析钢 ($w_C = 0.0218\% \sim 0.77\%$): 室温平衡组织为铁素体加珠光体。
- 2) 共析钢 ($w_C = 0.77\%$): 室温平衡组织为珠光体。
- 3) 过共析钢 ($w_C = 0.77\% \sim 2.11\%$): 室温平衡组织为珠光体加二次渗碳体。

3. 白口铸铁

碳质量分数 $w_C = 2.11\% \sim 6.69\%$ 的铁碳合金称为白口铸铁, 根据碳质量分数及室温组织的不同, 又可分为如下三类:

- 1) 亚共晶白口铸铁 ($w_C = 2.11\% \sim 4.3\%$): 室温平衡组织为珠光体加二次渗碳体加低温莱氏体。
- 2) 共晶白口铸铁 ($w_C = 4.3\%$): 室温平衡组织为低温莱氏体。
- 3) 过共晶白口铸铁 ($w_C = 4.3\% \sim 6.69\%$): 室温平衡组织为一次渗碳体加低温莱氏体。

第四节 典型铁碳合金的结晶过程

一、共析钢的结晶过程

共析钢的冷却过程如图 3-8 中合金 I 所示, 共析钢中碳的质量分数为 0.77% , 当液态合金冷却到与液相线相交于 1 点温度时, 开始从液相 (L) 中结晶出奥氏体 (A), 冷却到 2 点时, 液相全部结晶为奥氏体。从 2 点至 3 点温度范围内为单相奥氏体的冷却, 待冷却至 3 点温度 ($727^\circ C$) 时, 奥氏体发生共析转变 $A_{0.77} \rightleftharpoons (F + Fe_3C)$ 生成珠光体, 如图 3-9 所示。

珠光体中的渗碳体为共析渗碳体。珠光体是由层状的铁素体与渗碳体组成的, 由于渗碳体的数量少于铁素体, 所以片状珠光体中的渗碳体层片比铁素体的层片薄。共析钢的低倍显微组织如图 3-10 所示, 从中可以看到白色基底的铁素体和黑色条纹的渗碳体。当分辨率和放大倍数足够大时, 可以看到铁素体是有黑色边缘围着的白色窄条, 共析钢的室温组织是珠光体。

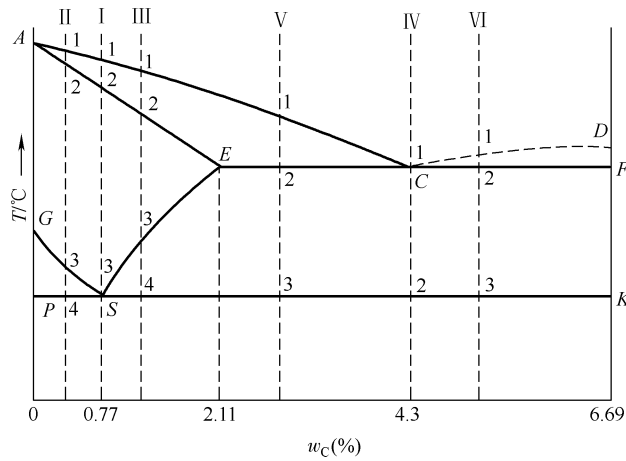


图 3-8 典型铁碳合金在 Fe-Fe₃C 相图中的位置

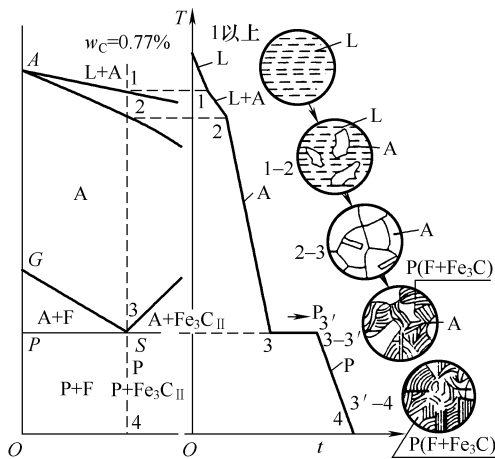


图 3-9 共析钢结晶过程示意图



图 3-10 共析钢的显微组织

二、亚共析钢的结晶过程

图 3-8 中合金 II 是碳质量分数为 0.45% 的亚共析钢，其冷却曲线和结晶过程如图 3-11 所示。金属液冷却到 1 点时，开始结晶出奥氏体，至 2 点结晶结束，2 点至 3 点间为单相奥氏体组织，当冷却到与 GS 线相交的 3 点时，开始从奥氏体中析出铁素体，称为先共析铁素体。3~4 点伴随温度的下降，铁素体量不断增加，其成分沿 GP 线变化，而奥氏体量则逐渐减少，成分沿 GS 线变化，由于奥氏体中不断析出铁素体，而铁素体中碳的质量分数仅为 0.0218%，所以合金内的大部分碳滞留在奥氏体中而使奥氏体的碳质量分数增加，待冷却到与共析线 PSK 线相交的 4 点温度（727℃）时，剩余奥氏体的碳质量分数达到 0.77%，奥氏体发生共析转变成珠光体，4 点以下至室温，合金组织不再发生变化，如图 3-12 所示。黑色部分为珠光体，白色部分为铁素体。亚共析钢的室温组织由铁素体和珠光体构成。碳质量分数不同时，珠光体和铁素体的相对量也不同，碳质量分数越大，亚共析钢中的珠光体数量也越大。显微组织中珠光体所占面积也就越大，通常可以根据金相显微组织中珠光体所占的

面积，估算出亚共析钢中碳质量分数，公式为

$$w_c = A_p \times 0.77\%$$

式中 w_c ——钢的碳质量分数。

A_p ——珠光体所占的面积百分数。

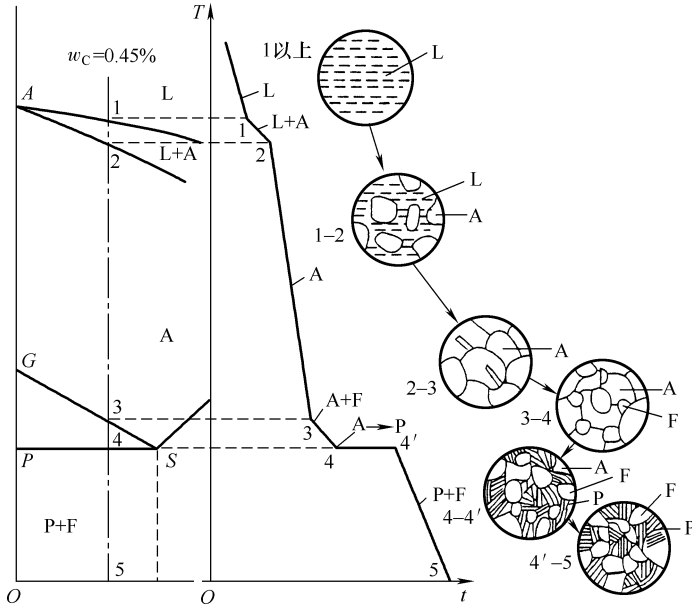


图 3-11 亚共析钢的结晶过程示意图

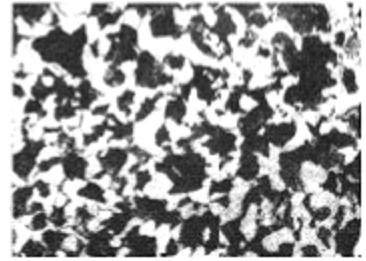


图 3-12 亚共析钢的显微组织

三、过共析钢的结晶过程

图 3-8 中合金Ⅲ是碳质量分数为 1.2% 的过共析钢，其冷却曲线和结晶过程如图 3-13 所示。在 3 点温度以上的冷却曲线及结晶与共析钢相同，待合金冷却到与 ES 线相交的 3 点温度时，奥氏体中的碳达到饱和，过剩的碳以渗碳体的形式从奥氏体中析出称为二次渗碳体。二次渗碳体是沿着奥氏体晶界析出，呈网状分布，随着温度下降，析出的二次渗碳体数量逐渐增多，剩余奥氏体中碳的质量分数沿 ES 线逐渐减少，当温度降到与共析线 PSK 相交的 4 点温度时，剩余奥氏体中的碳质量分数达到 0.77%。因此，剩余奥氏体就发生共析转变，生成珠光体，再继续冷却，合金组织不再发生变化。所以，过共析钢的室温组织为网状二次渗碳体和珠光体，如图 3-14 所示，白色为渗碳体，片状为珠光体。不同的过共析钢，组织中二次渗碳体和珠光体的相对量是不同的，钢中碳的质量分数越大，二次渗碳体也越多，而网状的二次渗碳体对钢的力学性能会产生不良影响。

四、共晶白口铸铁的结晶过程

图 3-8 中合金Ⅳ为碳质量分数为 4.3% 的共晶白口铸铁，其冷却曲线与结晶过程如图 3-15 所示。金属液冷却到共晶点 1 点时发生共晶转变生成高温莱氏体，用符号 L_d 表示。莱氏体由共晶奥氏体和共晶渗碳体组成，由 1 点温度继续下降，碳在奥氏体中的溶解度沿 ES 线降低，并不断从奥氏体中析出二次渗碳体，当温度冷却到与共析线 PSK 线相交的 2

点温度 (727°C) 时, 奥氏体中碳质量分数刚好是 0.77%, 奥氏体发生共析转变, 生成珠光体。所以, 共晶白口铸铁的室温组织是由珠光体、二次渗碳体及共晶渗碳体组成的, 这种组织称为低温莱氏体, 用符号 $L'd$ ($P + Fe_3C_{II} + Fe_3C$) 表示, 如图 3-16 所示。莱氏体的形态一般是粒状或条状的奥氏体均匀分布在渗碳体基体上, 黑色部分为珠光体, 白色基底为渗碳体。

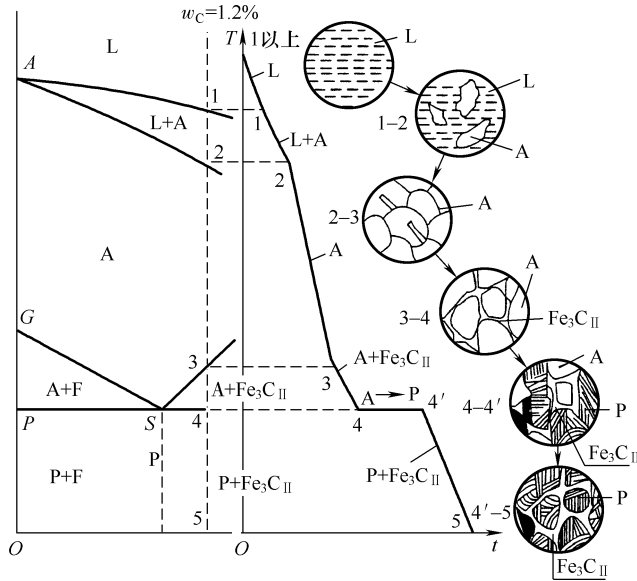


图 3-13 过共析钢的结晶过程示意图

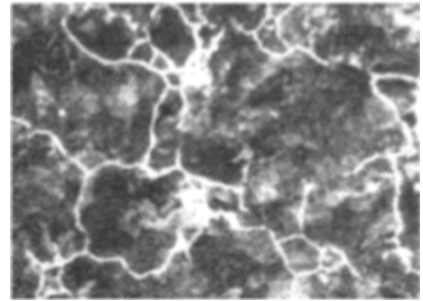


图 3-14 过共析钢的显微组织

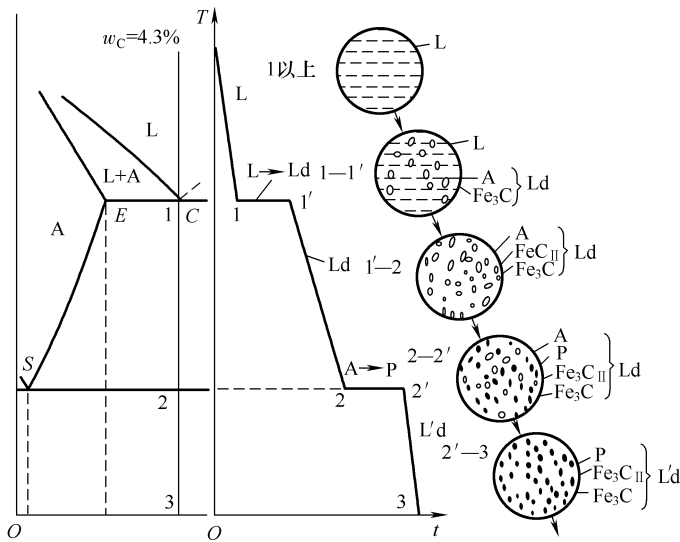


图 3-15 共晶白口铸铁结晶过程示意图

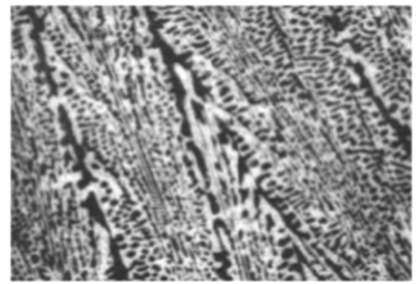


图 3-16 共晶白口铸铁的显微组织

五、亚共晶白口铸铁的结晶过程

图 3-8 中合金 V 是碳质量分数为 2.11% ~ 4.3% 的亚共晶白口铸铁，其冷却曲线与结晶过程如图 3-17 所示。当亚共晶白口铸铁冷却到 1 点温度时，开始从液相中结晶出奥氏体，奥氏体量随温度下降不断增多，其成分沿固相相线 AE 变化，而剩余液相成分沿液相相线 AC 变化，当冷却到与共晶线 ECF 相交于 2 点时，液相成分达到共晶点 C (1148℃) 而发生共晶转变生成莱氏体。当温度在 2~3 点温度区间时，奥氏体中不断析出二次渗碳体。随着二次渗碳体的析出，奥氏体的成分沿 ES 线不断降低，当温度达到 3 点 (727℃) 时，奥氏体的碳质量分数也达到 0.77%，则发生共析转变，所有的奥氏体均转变为珠光体，所以亚共晶白口铸铁的室温组织为珠光体、二次渗碳体和低温莱氏体。如图 3-18 所示，在亚共晶白口铸铁的金相显微组织中，呈树枝状分布的黑块是由奥氏体转变成的珠光体，珠光体周围的白色网状物为二次渗碳体，其余部分为低温莱氏体。

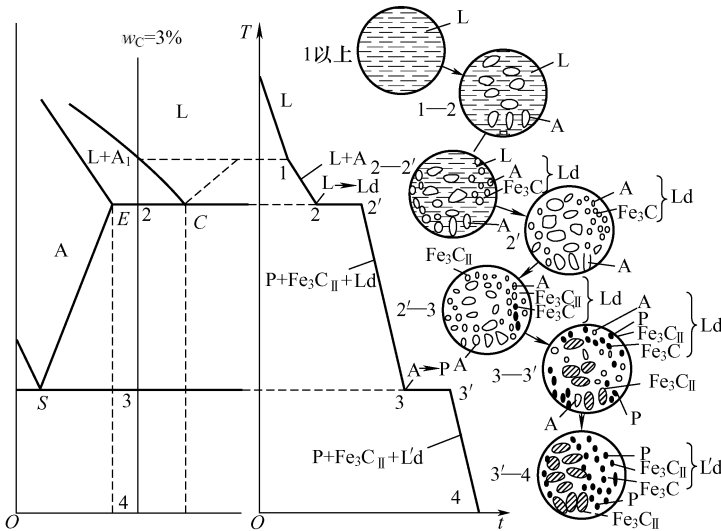


图 3-17 亚共晶白口铸铁的结晶过程示意图

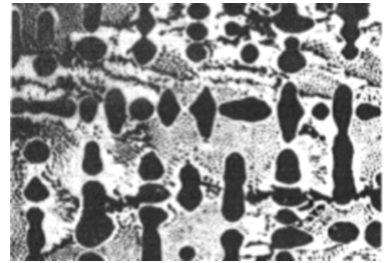


图 3-18 亚共晶白口铸铁的显微组织

六、过共晶白口铸铁的结晶过程

图 3-8 中合金 VI 是碳质量分数为 4.3% ~ 6.69% 的过共晶白口铸铁，其冷却曲线与结晶过程如图 3-19 所示，当过共晶白口铸铁金属液冷却到 1 点时，液体开始结晶，在 1~2 点温度区间，结晶出粗大的先共晶渗碳体称为一次渗碳体 Fe_3C_I 。随着一次渗碳体的增多，液相成分沿着 DC 线变化，当冷却到与共晶线 ECF 相交的 2 点温度时，液相碳质量分数达到 4.3%，为共晶成分，于是发生共晶转变生成莱氏体。在 2~3 点温度区间，共晶奥氏体中先析出二次渗碳体，在 3 点温度 (727℃) 恒温时发生共析转变成珠光体。所以，过共晶白口铸铁的室温组织为一次渗碳体和低温莱氏体，图 3-20 所示为过共晶白口铸铁的金相显微组织，图中亮白色板条状的为一次渗碳体，基底为低温莱氏体。

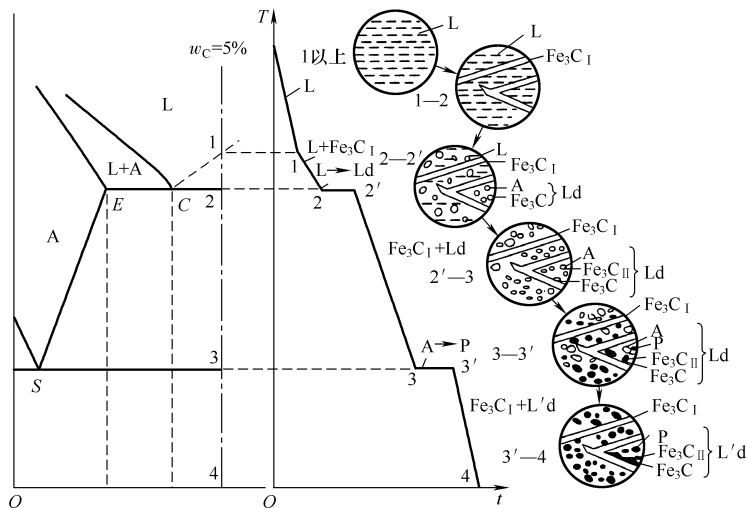


图 3-19 过共晶白口铸铁的结晶过程示意图

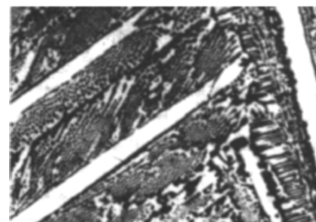


图 3-20 过共晶白口铸铁的显微组织

七、碳质量分数对铁碳合金组织和性能的影响

铁碳合金室温组织虽然都是由铁素体和渗碳体两相组成的，但由于碳质量分数的不同，组织中铁素体与渗碳体的数量、分布及形态也各不相同，力学性能也各异。

1. 碳质量分数对铁碳合金室温平衡组织的影响

根据图 3-21 所示的铁碳合金的成分与组织的关系，可以看出铁碳合金在不同碳质量分数条件下，与平衡结晶后的组织组成物及相组成物的定量关系。由图 3-7 中可看出，当碳质量分数为零时，合金由 100% 的铁素体组成，随着碳质量分数的增加，铁素体含量逐渐减少，直到 $w_c = 6.69\%$ 时降为零。同时，随着碳质量分数的增加，渗碳体的含量则由零增至

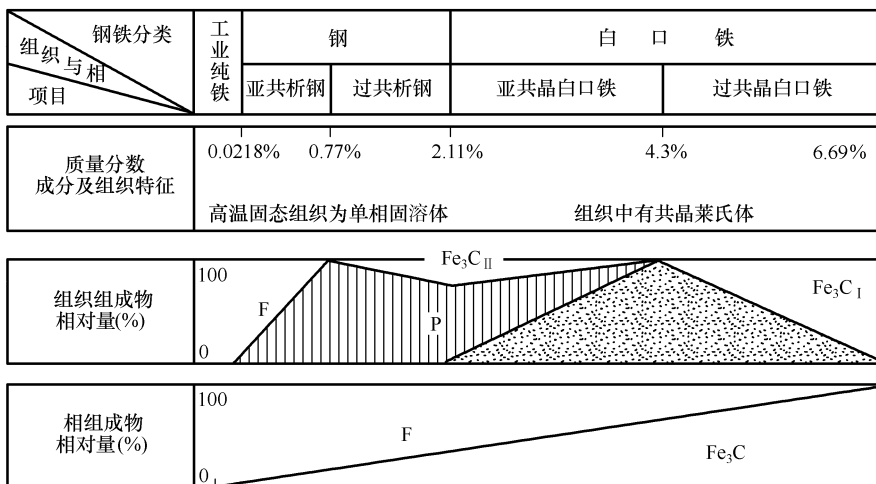
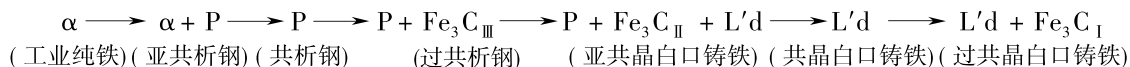


图 3-21 铁碳合金的成分与组织的关系

100%。随着碳质量分数的增加，铁碳合金组织变化如下：



由于碳质量分数的不同，铁素体与渗碳体的形态和分布也不相同，如从奥氏体中析出的铁素体一般呈块状，而共析反应生成的珠光体中的铁素体则呈交替层片状；又如共析钢中，共析渗碳体与铁素体呈交替层片状。在过共析钢中， Fe_3C_{II} 以网状分布于奥氏体的晶界上。在过共晶白口铸铁中， Fe_3C_I 呈规则的长条块。正是由于铁碳合金中铁素体与渗碳体的数量、形态、分布的不同，导致它们产生的性能也不相同。

2. 碳质量分数对力学性能的影响

由于在铁碳合金组织中，铁素体是软韧相，渗碳体是硬脆相，所以铁碳合金的力学性能取决于铁素体与渗碳体的相对量及它们的相对分布。如果合金的基体是铁素体，渗碳体作为强化相，那么，强化相的数量越多、分布越均匀，材料的强度就越高。但是如果渗碳体分布在晶界上，甚至作为基体时，强度尤其是塑性和韧性大大降低，如图 3-22 所示。工业纯铁是由铁素体构成的，所以，塑性很好，硬度、强度很低。亚共析钢中，随着碳质量分数的增加，铁素体逐渐减少而珠光体数量逐渐增多。所以，强度、硬度呈线性增大，塑性、韧性不断降低，共析钢中的强化相是珠光体组织，所以有较高的强度和硬度，但塑性较低。在过共析钢中，当碳质量分数达到 0.9% 时，强度达到最高值，随着碳质量分数的继续增加，强度则显著降低，这是由于具有脆性的二次渗碳体在碳质量分数大于 0.9% 时，在奥氏体组织的晶界处形成连续的网状，从而使钢的脆性增加，而硬度则始终直线上升。

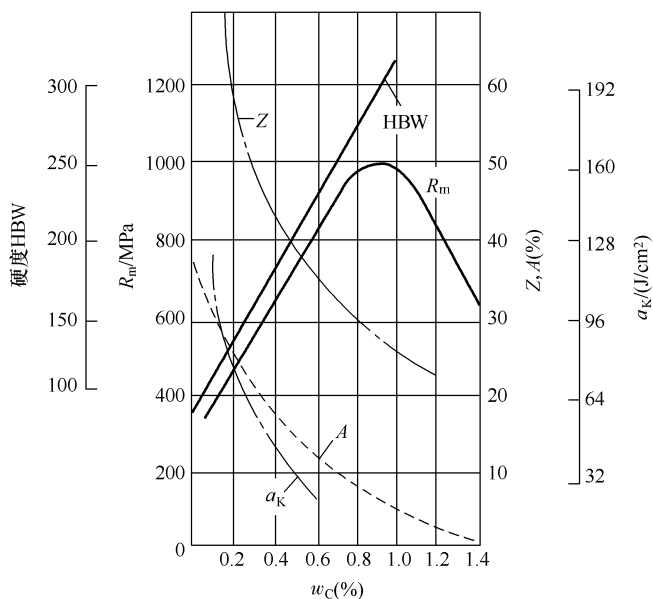


图 3-22 含碳量对铁碳合金力学性能的影响

铁碳合金的塑性变形主要由铁素体来实现。所以，当组织中出现以渗碳体作基体的莱氏体时，塑性则接近于零。冲击韧性对组织非常敏感，随着碳质量分数的增加，脆性的渗碳体

增多，冲击韧性则下降，当出现网状二次渗碳体时，韧性则急剧下降。生产中，若控制二次渗碳体的形态，不使其形成网状，则强度就不会明显下降。硬度则是随着碳质量分数的增加，铁碳合金的硬度呈直线上升。对于上述铁碳合金来说，由于处理方法和冷却条件的改变，其组织及性能也各不相同。在实际生产中，为保证铁碳合金具有一定的塑性和韧性，碳素钢及普通低、中合金钢碳的质量分数一般不超过 1.3%。

3. 铁碳合金相图的应用

(1) 在选材方面的应用 铁碳合金相图对生产具有重要的指导意义，铁碳合金相图总结了铁碳合金组织和性能随成分的变化规律，设计人员可以参照铁碳合金相图、根据零件的工作要求和性能要求选择适当的材料。低碳钢是塑性好、韧性高的材料，中碳钢是强度、硬度、塑性都较好的材料，而高碳钢是硬度高、耐磨性好的材料，白口铸铁则是耐磨性高、冲击韧度差的材料。

(2) 在铸造方面的应用 由相图可确定合金的浇注温度。共晶成分的铁碳合金熔点最低，结晶温度范围最小，有良好的铸造性能。生产中，根据相图中液相线的位置可确定各种铸钢和铸铁的浇注温度，如图 3-23 所示，为制订铸造工艺提供了依据。

(3) 在可锻性方面的应用 金属的可锻性是金属在压力加工时，能改变形状而不产生裂纹的性能。奥氏体具有良好的塑性，钢加热到高温时可获得单相奥氏体组织，可锻性好，因此钢的始轧温度一般选在固相线以下 100 ~ 200℃ 的奥氏体区内。亚共析钢终锻温度控制在 *GS* 线偏上的位置，对过共析钢控制在 *PSK* 线偏上的位置，白口铸铁由于是以硬而脆的渗碳体为基体，故很难锻造，如图 3-23 所示。

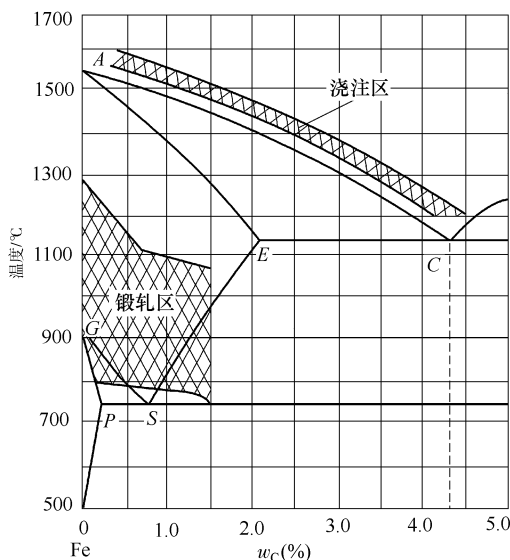


图 3-23 铁碳合金相图与铸锻工艺的关系

(4) 在焊接方面的应用 焊接时，焊缝到母材各区域的温度是不同的，由铁碳合金相图可知，不同加热温度的各区域在随后的冷却中可能会出现不同的组织与性能，所以，在焊

接后需要用热处理的方法加以改善。此外，铁碳合金相图对制订热处理工艺有非常重要的意义，在后续章节将详细介绍。

第五节 碳 素 钢

碳素钢简称碳钢，指碳质量分数大于 0.0218% 小于 2.11%，且不含有特意加入合金元素的铁碳合金。由于碳钢冶炼成本低，加工容易，价格低廉，同时具有良好的力学性能和工艺性能，所以在建筑、交通运输和机械制造中得到了广泛的应用。

一、常存杂质元素对碳钢性能的影响

碳钢中除铁碳两个基本元素外，还含有少量的锰（Mn）、硅（Si）、硫（S）、磷（P）元素，它们是存在于矿石或冶炼过程中自然溶入钢中的，这些元素称为常存杂质。它们对碳钢的力学性能和工艺性能产生影响，所以在生产中对这些常存杂质要严格控制。

1. 硅

硅能溶于铁素体中，形成含硅铁素体，从而提高钢的强度和硬度，所以硅是钢中的有益元素。在碳素钢中，硅的质量分数一般控制在 0.17% ~ 0.37% 之间。

2. 锰

锰是在冶炼时作为脱氧剂加入钢中的，锰能溶于铁素体，起到固溶强化的作用，从而提高钢的强度和硬度。此外，锰能与硫形成 MnS，从而减轻硫对钢的危害。所以锰也是钢中的有益元素。在碳素钢中，锰的质量分数一般控制在 0.25% ~ 0.80% 之间。

3. 硫

硫是随同矿石或燃料带入钢中的常存杂质。硫在钢中与铁生成 FeS，而 FeS 继续与铁形成共晶体（FeS + Fe），其熔点低（985℃），当钢材加热到 1000 ~ 1200℃ 进行轧制或锻造时，沿晶界分布的（FeS + Fe）共晶体已熔化，多晶粒间的连接被破坏，引起钢材开裂，这种现象称为热脆。含硫量高的钢，因热脆性难于进行热压力加工。因此，硫是钢中的有害杂质，一般钢中硫的质量分数不得超过 0.05%。

4. 磷

磷是由铁矿石和生铁等炼钢原料带入钢中的。磷在铁中有较大的溶解度，室温下磷在 α -Fe 中的溶解度达 1.2%。由于部分磷溶解在铁素体中形成固溶体，部分在结晶时形成脆性很大的化合物（Fe₃P），使得钢的塑性和韧性急剧下降，尤其是低温韧性，称为冷脆。磷对钢来说是有害元素，一般钢中磷的质量分数应控制在 0.04% 以下。当然，在易切削钢中适当提高硫、磷质量分数，则有利于切削和延长刀具寿命。

二、碳钢的分类

碳钢的品种很多，为了便于生产、使用、管理和研究，对钢要进行分类和统一编号。

1. 按碳质量分数分类

- 1) 低碳钢： $w_c \leq 0.25\%$ 。
- 2) 中碳钢： w_c 为 0.25% ~ 0.60%。

3) 高碳钢: $w_c \geq 0.60\%$ 。

2. 按有害元素质量分数分类

根据钢中有害元素硫、磷质量分数的多少划分如下:

- 1) 普通碳素钢: $w_s \leq 0.050\%$, $w_p \leq 0.045\%$ 。
- 2) 优质碳素钢: $w_s \leq 0.035\%$, $w_p \leq 0.035\%$ 。
- 3) 高级优质碳素钢: $w_s \leq 0.025\%$, $w_p \leq 0.025\%$ 。

3. 按用途分类

(1) 碳素结构钢 用于制造工程构件和机械零件的钢。工程用钢主要用于建筑、桥梁、船舶和车辆等; 机器零件用钢包括渗碳钢、调质钢、轴承钢和弹簧钢等, 碳质量分数一般小于 0.70%。

(2) 碳素工具钢 用于制造各种刀具、模具及量具等, 碳质量分数一般大于 0.70%。

4. 按冶炼时脱氧程度分类

- 1) 沸腾钢: 脱氧程度不完全的钢。
- 2) 镇静钢: 脱氧程度完全的钢。
- 3) 半镇静钢: 脱氧程度介于沸腾钢与镇静钢之间的钢。

三、碳钢的牌号和应用

碳钢的牌号是根据国家标准《钢铁产品表示方法》(GB/T 221—2008) 制订的。下面介绍各类碳钢的牌号、性能和用途。

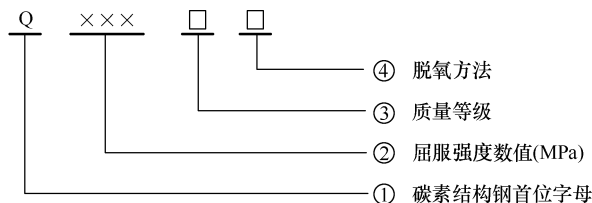
1. 碳素结构钢

(1) 普通碳素结构钢 由于普通碳素结构钢的杂质较多, 碳质量分数较低, 焊接性能好, 塑性、韧性好, 冶炼容易, 价格低, 产量大。在性能上能满足桥梁、建筑等工程构件和一些受力不大的机械零件(如螺钉、螺母等), 一般在热轧状态下直接使用, 很少再进行热处理。

根据 GB/T 700—2006 的规定, 碳素结构钢的表示方法为

Q + 数字 + (质量等级符号) + (脱氧方法符号) + (专门用途的符号)。

钢号冠以“Q”, 代表钢材屈服强度“屈”字汉语拼音的首位字母; “Q”后面的数字表示屈服强度值, 单位是 MPa。例如, Q235 表示屈服强度为 235MPa 的碳素结构钢; 质量等级符号分别为 A、B、C、D, 质量依次升高, 其中 A 级硫、磷质量分数最高, D 级硫、磷质量分数最低。脱氧方法符号: F 表示沸腾钢、Z 表示镇静钢、TZ 表示特殊镇静钢, “Z”与“TZ”符号可以省略。



例如: Q235AF 表示 A 级沸腾钢。碳素钢的牌号、化学成分、力学性能见表 3-2。

表 3-2 碳素结构钢的牌号、化学成分和力学性能

| 牌号 | 等级 | 化学成分 (质量分数) (%), 不大于 | | | | | 脱氧方法 | 力学性能 | | |
|------|----|----------------------|------|------|-------|-------|------|---------------|------------|-------|
| | | C | Mn | Si | S | P | | R_{eL} /MPa | R_m /MPa | A (%) |
| Q195 | — | 0.12 | 0.50 | 0.30 | 0.040 | 0.035 | F、Z | 195 | 315 ~ 430 | 33 |
| Q215 | A | 0.15 | 1.2 | 0.35 | 0.050 | 0.045 | F、Z | 215 | 335 ~ 450 | 31 |
| | B | | | | 0.045 | | | | | |
| Q235 | A | 0.22 | 1.4 | 0.35 | 0.050 | 0.045 | F、Z | 235 | 375 ~ 500 | 26 |
| | B | 0.20 | | | 0.045 | | | | | |
| | C | 0.17 | | | 0.040 | 0.040 | Z | | | |
| | D | | | | 0.035 | 0.035 | TZ | | | |
| Q275 | A | 0.24 | 1.5 | 0.35 | 0.050 | 0.045 | F、Z | 275 | 410 ~ 540 | 22 |
| | B | 0.21 | | | 0.045 | 0.045 | Z | | | |
| | C | 0.22 | | | 0.040 | 0.040 | Z | | | |
| | D | 0.20 | | | 0.035 | 0.035 | TZ | | | |

(2) 优质碳素结构钢 含硫、磷及非金属杂质数量较少, 在制造重要机械零件中应用广泛, 常在加工过程中应用热处理方法以提高其力学性能。

优质碳素结构钢的表示方法: 数字 + (元素符号) + (脱氧方法符号) + (专门用途的符号)。数字表示平均碳质量分数的万分比。例如, 平均碳质量分数为 0.45% 的钢, 钢号为 45; 对于含锰量较高的优质碳素结构钢 ($w_{Mn} = 0.7\% \sim 1.2\%$), 在数字后面要标出元素锰的符号, 如“65Mn”钢表示平均碳质量分数为 0.65%, 锰质量分数为 0.70% ~ 1.2% 的优质碳素结构钢。对于沸腾钢及专门用途的优质碳素结构钢, 应在钢号后标出相应的符号, 如 20G 钢是平均碳质量分数为 0.20% 的锅炉用优质碳素结构钢。高级优质碳素结构钢, 在牌号后加符号“A”, 如平均碳质量分数为 0.45% 的高级优质碳素结构钢, 其牌号为“45A”。

08、08F、10、10F 钢属于低碳钢, 强度、硬度较低, 塑性、韧性、焊接性及冷成形性好, 用于制作冷冲压件, 如汽车车身, 仪表外壳等。

15 ~ 25 钢也属于低碳钢, 经渗碳、淬火处理后则表硬内韧, 用于制造表面要求耐磨而内部强度要求不高的零件, 如法兰盘、小轴等。

30 ~ 55 钢属于中碳钢, 经淬火加高温回火后具有良好的综合力学性能, 其塑性和韧性随碳质量分数的增加而下降, 但切削性能好, 有较高的强度和硬度。主要用于制作轴类零件, 如曲轴、连杆、车床主轴、齿轮等。

60 以上属于高碳钢, 经淬火和中温回火后具有较高的强度、硬度和弹性, 但焊接性不好, 切削性、冷变形塑性差, 主要用于制作强度、耐磨性和弹性要求较高的零件, 如气门弹簧、板弹簧及螺旋弹簧等。优质碳素结构钢的牌号、化学成分和力学性能见表 3-3。优质碳素结构钢的用途见表 3-4。

表 3-3 优质碳素结构钢的牌号、化学成分和力学性能

| 牌号 | 化学成分 (质量分数) (%) | | | 力学性能 | | | | | | |
|------|-----------------|-------------|-------------|----------|-------|----|----|-------------------|--------|-----|
| | | | | R_{eL} | R_m | A | Z | a_K | 硬度 HBW | |
| | C | Si | Mn | MPa | | % | | J/cm ² | 未热处理钢 | 退火钢 |
| | | | | 不小于 | | | | | | 不大于 |
| 08F | 0.05 ~ 0.11 | ≤0.03 | 0.25 ~ 0.50 | 175 | 295 | 35 | 60 | — | 131 | — |
| 08 | 0.05 ~ 0.11 | 0.17 ~ 0.37 | 0.35 ~ 0.65 | 195 | 325 | 33 | 60 | — | 131 | — |
| 10F | 0.07 ~ 0.13 | ≤0.07 | 0.25 ~ 0.50 | 185 | 315 | 33 | 55 | — | 137 | — |
| 10 | 0.07 ~ 0.13 | 0.17 ~ 0.37 | 0.35 ~ 0.65 | 205 | 335 | 31 | 55 | — | 137 | — |
| 15F | 0.12 ~ 0.18 | ≤0.07 | 0.25 ~ 0.50 | 205 | 355 | 29 | 55 | — | 143 | — |
| 15 | 0.12 ~ 0.18 | 0.17 ~ 0.37 | 0.35 ~ 0.65 | 225 | 375 | 27 | 55 | — | 143 | — |
| 20 | 0.17 ~ 0.23 | 0.17 ~ 0.37 | 0.35 ~ 0.65 | 245 | 410 | 25 | 55 | — | 156 | — |
| 25 | 0.22 ~ 0.29 | 0.17 ~ 0.37 | 0.50 ~ 0.80 | 275 | 450 | 23 | 50 | 83.5 | 170 | — |
| 30 | 0.27 ~ 0.34 | 0.17 ~ 0.37 | 0.50 ~ 0.80 | 295 | 490 | 21 | 50 | 78.5 | 179 | — |
| 35 | 0.32 ~ 0.39 | 0.17 ~ 0.37 | 0.50 ~ 0.80 | 315 | 530 | 20 | 45 | 68.7 | 197 | — |
| 40 | 0.37 ~ 0.44 | 0.17 ~ 0.37 | 0.50 ~ 0.80 | 335 | 570 | 19 | 45 | 58.8 | 217 | 187 |
| 45 | 0.42 ~ 0.50 | 0.17 ~ 0.37 | 0.50 ~ 0.80 | 355 | 600 | 16 | 40 | 49 | 229 | 197 |
| 50 | 0.47 ~ 0.55 | 0.17 ~ 0.35 | 0.50 ~ 0.80 | 375 | 630 | 14 | 40 | 39.2 | 241 | 207 |
| 55 | 0.52 ~ 0.60 | 0.17 ~ 0.37 | 0.50 ~ 0.80 | 380 | 645 | 13 | 35 | — | 255 | 217 |
| 60 | 0.57 ~ 0.65 | 0.17 ~ 0.37 | 0.50 ~ 0.80 | 400 | 675 | 12 | 35 | — | 255 | 229 |
| 65 | 0.62 ~ 0.70 | 0.17 ~ 0.37 | 0.50 ~ 0.80 | 410 | 695 | 10 | 30 | — | 255 | 229 |
| 70 | 0.67 ~ 0.75 | 0.17 ~ 0.37 | 0.50 ~ 0.80 | 420 | 715 | 9 | 30 | — | 269 | 229 |
| 75 | 0.72 ~ 0.80 | 0.17 ~ 0.37 | 0.50 ~ 0.80 | 880 | 1080 | 7 | 30 | — | 285 | 241 |
| 80 | 0.77 ~ 0.85 | 0.17 ~ 0.37 | 0.50 ~ 0.80 | 930 | 1080 | 6 | 30 | — | 285 | 241 |
| 85 | 0.82 ~ 0.90 | 0.17 ~ 0.37 | 0.50 ~ 0.80 | 980 | 1130 | 6 | 30 | — | 302 | 255 |
| 15Mn | 0.12 ~ 0.18 | 0.17 ~ 0.37 | 0.70 ~ 1.00 | 245 | 410 | 26 | 55 | — | 163 | — |
| 20Mn | 0.17 ~ 0.23 | 0.17 ~ 0.37 | 0.70 ~ 1.00 | 275 | 450 | 24 | 50 | — | 197 | — |
| 25Mn | 0.22 ~ 0.29 | 0.17 ~ 0.37 | 0.70 ~ 1.00 | 295 | 490 | 22 | 50 | 88.3 | 207 | — |
| 30Mn | 0.27 ~ 0.39 | 0.17 ~ 0.37 | 0.70 ~ 1.00 | 315 | 540 | 20 | 45 | 78.5 | 217 | 187 |
| 35Mn | 0.32 ~ 0.39 | 0.17 ~ 0.37 | 0.70 ~ 1.00 | 335 | 560 | 18 | 45 | 68.7 | 229 | 197 |
| 40Mn | 0.37 ~ 0.44 | 0.17 ~ 0.37 | 0.70 ~ 1.00 | 355 | 590 | 17 | 45 | 58.8 | 229 | 207 |
| 45Mn | 0.42 ~ 0.50 | 0.17 ~ 0.37 | 0.70 ~ 1.00 | 375 | 620 | 15 | 40 | 49 | 241 | 217 |
| 50Mn | 0.48 ~ 0.56 | 0.17 ~ 0.37 | 0.70 ~ 1.00 | 390 | 645 | 13 | 40 | 39.2 | 255 | 217 |
| 60Mn | 0.57 ~ 0.65 | 0.17 ~ 0.37 | 0.70 ~ 1.00 | 410 | 695 | 11 | 35 | — | 269 | 229 |
| 65Mn | 0.62 ~ 0.70 | 0.17 ~ 0.37 | 0.90 ~ 1.20 | 430 | 735 | 9 | 30 | — | 285 | 229 |
| 70Mn | 0.67 ~ 0.75 | 0.17 ~ 0.37 | 0.90 ~ 1.20 | 450 | 785 | 8 | 30 | — | 285 | 229 |

表 3-4 优质碳素结构钢的用途

| 牌 号 | 用 途 |
|--------------|---|
| 08 08F | 用于制成薄板, 制造深冲制品、油桶、高级搪瓷制品, 也可用于制成管子、垫片及心部强度要求不高的渗碳和碳氮共渗零件, 焊条等 |
| 10 10F | 用于制造锅炉管、油桶顶盖、钢带、钢丝、钢板和型材, 也可制作机械零件 |
| 15 15F | 用于制造机械上的渗碳零件、紧固零件、冲锻模件及不需热处理的低负荷零件, 如螺栓、螺钉、拉条、法兰盘及化工机械用储存器、蒸汽锅炉等 |
| 20 | 用于不经受很大应力而要求韧性的各种机械零件, 如拉杆、轴套、螺钉、起重钩等; 也用于制造在 5.884MPa、450℃ 以下非腐蚀介质中使用的管子、导管等 |
| 25 | 用作热锻和热冲压的机械零件, 机床上的渗碳及碳氮共渗零件, 以及重型和中型机械制造中负荷不大的轴、辊子、连接器、垫圈、螺栓、螺母等, 还可用作铸钢件 |
| 30 | 用作热锻和热冲压的机械零件、冷拉丝、重型和一般机械用的轴、拉杆、套环, 以及机械上用的铸件, 如气缸、汽轮机机架、轧钢机机架和零件、机床机架、飞轮等 |
| 35 | 用作热锻和热冲压的机械零件, 冷拉和冷顶锻钢材, 无缝钢管, 机械制造中的零件, 如转轴、曲轴、轴销、杠杆、横梁、星轮、套筒、钩环、垫圈、螺钉、螺母等; 还可用来铸造汽轮机机身, 轧钢机机身、飞轮、均衡器等 |
| 40 | 用来制造机器的运动零件, 如辊子、轴、曲柄销、传动轴、活塞杆、连杆、圆盘等, 以及火车的车轴 |
| 45 | 用来制造蒸汽轮机、压缩机、泵的运动零件, 还可以用来代替渗碳钢制造齿轮、轴、活塞销等零件, 但零件需经高频或火焰淬火, 并可用作铸件 |
| 50 | 用于耐磨性要求高、动载荷及冲击作用不大的零件, 如铸造齿轮、拉杆、轧辊、轴摩擦盘、次要的弹簧、农机上的掘土犁铧、重负荷的心轴与轴等 |
| 55 | 用于制造齿轮、连杆、轮圈、轮缘、扁弹簧及轧辊等, 也作铸件 |
| 60 | 用于制造轧辊、轴、偏心轴、弹簧圈、各种垫圈、离合器、凸轮、钢丝绳等 |
| 65 | 用于制造气门弹簧、弹簧圈、轴、轧辊、各种垫圈、凸轮及钢丝绳等 |
| 70 80 | 用于制造弹簧 |
| 15Mn 20Mn | 用于制造中心部分的力学性能要求较高且需渗碳的零件 |
| 30Mn | 用于制造螺栓、螺母、螺钉、杠杆、制动踏板; 还可以制造在高应力下工作的细小零件, 如农机上的钩、环、链等 |

2. 碳素工具钢

碳素工具钢是碳的质量分数在 0.70% 以上的高碳钢。它主要用于制造模具、刀具和量具, 属于优质或高级优质钢。

碳素工具钢表示方法: 字母 T + 数字 + (元素符号) + (质量等级符号)。“T”为汉字“碳”的拼音的首位字母, 数字表示钢中碳质量分数的千分之几。如 T7 表示平均碳质量分数为 0.70% 的碳素工具钢, 如果是高级优质碳素工具钢, 则在数字后面标注字母“A”, 如 T13A 表示平均碳质量分数为 1.3% 的高级优质碳素工具钢。

碳素工具钢经淬火和低温回火后，硬度高，主要用于制作尺寸较小、形状简单的量具、模具等。碳素工具钢的牌号、化学成分、力学性能和用途见表 3-5。

表 3-5 碳素工具钢的牌号、化学成分、力学性能和用途

| 牌 号 | 化学成分 (质量分数) (%) | | | | | 热处理 | | 应用举例 |
|------|-----------------|-------------|-------|-------|--------|------------------|-----------|-------------------------------------|
| | C | Mn | Si | S | P | 淬火温度和冷却剂 | HRC (不小于) | |
| T7 | 0.65 ~ 0.74 | ≤0.40 | ≤0.35 | ≤0.03 | ≤0.035 | 800 ~ 820℃ 水淬 | 62 | 受冲击而要求较高硬度和耐磨性的工具，如木工用铍、锤头、钻头、模具等 |
| T8 | 0.75 ~ 0.84 | | | | | 780 ~ 800℃ 水淬 | | |
| T8Mn | 0.80 ~ 0.90 | 0.40 ~ 0.60 | | | | | | |
| T9 | 0.85 ~ 0.94 | ≤0.40 | ≤0.35 | ≤0.03 | ≤0.035 | 760 ~ 780℃ 水淬 | 62 | 受中等冲击的工具和耐磨机件，如刨刀、冲模、丝锥、板牙、手工锯条、卡尺等 |
| T10 | 0.95 ~ 1.04 | | | | | | | |
| T11 | 1.05 ~ 1.14 | | | | | | | |
| T12 | 1.15 ~ 1.24 | | | | | | | |
| T13 | 1.25 ~ 1.35 | | | | | | | |
| | | | | | | | | 不受冲击而要求极高硬度的工具和耐磨机件，如钻头、锉刀、刮刀、量具等 |

3. 铸造碳钢

铸造碳钢的碳质量分数为 0.20% ~ 0.60%，牌号由汉字“铸钢”两字拼音的首位字母“ZG”为符号，再连接两组数字，第一组数字代表屈服强度，第二组数字代表抗拉强度，如 ZG310-570 表示屈服强度不小于 310MPa，抗拉强度不小于 570MPa 的铸造碳钢。

铸造碳钢主要用于制造形状复杂，力学性能要求较高，不能用铸铁来替代的机械零件，不同牌号的铸造碳钢用于制作不同要求的零件。如：

ZG200-400 用于制作机座、变速箱等。

ZG230-450 用于制作轴承盖、外壳、阀体等。

ZG270-500 用于制作连杆、缸体、曲轴等。

ZG310-570 用于制作大齿轮、缸体、制动轮等。

ZG340-640 用于制作齿轮、棘轮等。

铸造碳钢的牌号、化学成分和力学性能见表 3-6。

表 3-6 铸造碳钢的牌号、化学成分和力学性能

| 牌 号 | 化学成分 (质量分数) (%) | | | | | 室温下的力学性能 | | | | |
|-----------|-----------------|------|------|-------|---|--------------------------------|-------------|-------|-------|------------------------------|
| | C | Si | Mn | P | S | R_{el} 或 $R_{p0.2}$ / MPa | R_m / MPa | A (%) | Z (%) | a_k / (J/cm ²) |
| | 不大于 | | | | | 不小于 | | | | |
| ZG200-400 | 0.20 | 0.60 | 0.80 | 0.035 | | 200 | 400 | 25 | 40 | 60 |
| ZG230-450 | 0.30 | 0.60 | 0.90 | 0.035 | | 230 | 450 | 22 | 32 | 45 |
| ZG270-500 | 0.40 | 0.60 | 0.90 | 0.035 | | 270 | 500 | 18 | 25 | 35 |
| ZG310-570 | 0.50 | 0.60 | 0.90 | 0.035 | | 310 | 570 | 15 | 21 | 30 |
| ZG340-640 | 0.60 | 0.60 | 0.90 | 0.035 | | 340 | 640 | 10 | 18 | 20 |

本章小结

1. 铁碳合金分为工业纯铁、钢和白口铸铁。工业纯铁是碳质量分数 $< 0.0218\%$ 的铁碳合金，钢是碳质量分数为 $0.0218\% \sim 2.11\%$ 的铁碳合金。根据碳质量分数及室温组织的不同，钢又可分为三类：亚共析钢 ($w_c = 0.0218\% \sim 0.77\%$)，室温平衡组织为铁素体加珠光体；共析钢 ($w_c = 0.77\%$)，室温平衡组织为珠光体；过共析钢 ($w_c = 0.77\% \sim 2.11\%$)，室温平衡组织为珠光体加二次渗碳体。白口铸铁是碳质量分数为 $2.11\% \sim 6.69\%$ 的铁碳合金。

2. 铁碳合金的基本组织包括奥氏体、铁素体、渗碳体、珠光体和莱氏体。

3. 掌握典型铁碳合金的结晶过程及室温组织。

4. 铁碳合金相图的应用包括在选材方面的应用、在铸造方面的应用、在可锻性方面的应用和在焊接方面的应用。

5. 碳钢的分类

1) 按碳质量分数划分：低碳钢、中碳钢及高碳钢。

2) 按质量划分：普通碳素钢、优质碳素钢及高级优质碳素钢。

3) 按用途划分：碳素结构钢、碳素工具钢。

4) 按冶炼时脱氧程度划分：沸腾钢、镇静钢及半镇静钢。

复习思考题

1. 何谓铁碳合金？试举例说明。
2. 根据溶质原子在溶剂晶格中的位置不同，固溶体可分为哪两种？
3. 何谓铁素体、奥氏体、渗碳体、珠光体及莱氏体？它们各用什么符号表示？各有何性能特点？
4. 何谓铁碳合金相图？绘出简化后的 Fe-Fe₃C 相图，说明图中主要特性点和线的含义。
5. 何谓共晶转变？写出铁碳合金中的共晶转变反应式。
6. 何谓碳素钢？根据碳质量分数和室温组织的不同，钢分为哪几类？试述它们的含碳量范围和室温组织。
7. 铁碳合金状态图有哪些方面的应用？
8. 硅、锰、磷、硫对钢性能有何影响？
9. 指出 Q235、20、45、65、65Mn、T8、T8Mn、T8A、T8MnA、Y20、ZG270-500 各属于哪一类钢？它们的符号和数字各表示什么意思？
10. 碳素工具钢有什么特点？在哪些方面应用？
11. 什么是铸钢？铸钢有什么特点？
12. 低碳钢、中碳钢和高碳钢是怎样划分的？
13. 以组织组成物标注 Fe-Fe₃C 相图。
14. 随着碳质量分数的增加，Fe-C 合金的组织 and 性能是如何变化的？
15. 根据铁碳合金相图填写下表。

| 碳的质量分数 (%) | 温度/°C | 显微组织 | 温度/°C | 显微组织 |
|------------|-------|------|-------|------|
| 0.45 | 800 | | 900 | |
| 0.77 | 700 | | 900 | |
| 1.20 | 600 | | 800 | |

16. 45 钢、T12A 钢按碳质量分数、质量、用途划分各属于哪类钢？