



# 简明热处理手册



北 京 出 版 社

TG 15-62

J 37

# 简明热处理手册

《简明热处理手册》编写组编



北 京 出 版 社

212916

# 简明热处理手册

Jianming rechuili shouce

《简明热处理手册》编写组编

\*

北京出版社出版

(北京崇文门外东兴隆街 51 号)

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印刷

\*

787×1092 毫米 32 开本 19 印张 406,000 字

1985 年 1 月第 1 版 1985 年 1 月第 1 次印刷

印数 1—34,000

书号: 15071·59 定价: 3.15 元

## 前言

热处理是提高金属材料及其制品质量的重要手段。

近年来，随着工业的发展，对金属材料的性能提出了更多更高的要求，因而热处理技术也向着优质、高效、节能和无公害的方向迅速发展。为了帮助热处理工作者能较好地解决生产中遇到的问题，我们经过较广泛地调查研究和收集有关资料，结合具体生产实践和体会，编写了《简明热处理手册》，供广大热处理工作者参考。

本手册以金属材料热处理的常规工艺、常用数据、实用经验和关键性的技术或工艺为重点，对热处理的新工艺也做了扼要的介绍，以便更好地起到备查、提示和启发的作用。为使手册能达到简明、实用和便于查用的目的，其中大部分内容是以图表的形式反映出来的，力求做到既反映共性，又突出重点。

本手册由张建华、王民棣、汤志强、张政民、郭俊、崔德钧统编定稿。参加编写工作的有：王孝森、郭俊、郝超、张建华、王德海、邱大年、玉罗以、李泉华、汤志强、王民棣、陈树旺、王福贞、宣崇武、王维杰、王岐、崔德钧、李灿碧、李祖德、杨春江、翟宝隆、孙蕴才、缪绍基、殷可生、张政民、李凤鸣、唐弄娣、牛征、李祥筠、郭建寅等同志。

在编写这本手册的过程中，承北京市技术交流站热处理技术交流队给予大力支持和协助，提供了不少宝贵经验和资

料：樊东黎、王洪发、支道光等同志也给了我们很大的帮助，在此一併表示感谢。

这本手册是集体写作，由于我们经验不足，水平有限，定会存在不少缺点和错误，希望广大读者批评指正。

《简明热处理手册》编写组

一九八三年七月

# 目 录

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| 第一章 钢的热处理 .....         | ( 1 )  |
| § 1—1 钢的热处理基础 .....     | ( 1 )  |
| 一、铁碳平衡图 .....           | ( 1 )  |
| 二、过冷奥氏体的转变 .....        | ( 2 )  |
| § 1—2 退火和正火 .....       | ( 10 ) |
| 一、退火 .....              | ( 10 ) |
| 二、正火 .....              | ( 12 ) |
| 三、退火和正火后的机械性能 .....     | ( 13 ) |
| § 1—3 淬火 .....          | ( 16 ) |
| 一、淬火温度的选择和加温时间 .....    | ( 16 ) |
| 二、淬火冷却介质 .....          | ( 18 ) |
| 三、钢的淬透性及淬透性曲线的应用 .....  | ( 19 ) |
| 四、淬火方法 .....            | ( 26 ) |
| 五、低碳马氏体淬火 .....         | ( 39 ) |
| § 1—4 钢的回火 .....        | ( 40 ) |
| 一、回火工艺参数和工艺分类 .....     | ( 41 ) |
| 二、回火脆性 .....            | ( 52 ) |
| § 1—5 钢的冷处理 .....       | ( 53 ) |
| 一、冷处理的作用 .....          | ( 53 ) |
| 二、冷处理工艺参数和工艺流程的确定 ..... | ( 53 ) |
| 三、冷冻剂及冷处理设备 .....       | ( 56 ) |
| § 1—6 炉内气氛控制 .....      | ( 59 ) |

|                       |         |
|-----------------------|---------|
| 一、炉气的选择 .....         | ( 59 )  |
| 二、碳势控制 .....          | ( 64 )  |
| § 1—7 强韧化热处理 .....    | ( 73 )  |
| 一、超高温淬火 .....         | ( 74 )  |
| 二、亚温淬火 .....          | ( 74 )  |
| 三、回火对韧性的影响 .....      | ( 75 )  |
| 四、形变热处理 .....         | ( 75 )  |
| § 1—8 真空热处理 .....     | ( 77 )  |
| 一、真空淬火 .....          | ( 77 )  |
| 二、真空退火 .....          | ( 79 )  |
| 三、真空化学热处理 .....       | ( 81 )  |
| 第二章 钢的表面强化处理 .....    | ( 86 )  |
| § 2—1 表面淬火 .....      | ( 86 )  |
| 一、感应加热表面淬火 .....      | ( 86 )  |
| 二、火焰加热表面淬火 .....      | ( 104 ) |
| 三、电接触表面淬火 .....       | ( 107 ) |
| 四、激光和电子束热处理 .....     | ( 109 ) |
| § 2—2 钢的化学热处理 .....   | ( 111 ) |
| 一、钢的渗碳 .....          | ( 112 ) |
| 二、钢的渗氮 .....          | ( 125 ) |
| 三、钢的碳氮共渗 .....        | ( 130 ) |
| 四、钢的离子渗氮 .....        | ( 145 ) |
| 五、钢的渗硼 .....          | ( 150 ) |
| 六、钢的渗金属 .....         | ( 162 ) |
| 七、钢的气相沉积 .....        | ( 168 ) |
| 第三章 其它金属材料的热处理 .....  | ( 173 ) |
| § 3—1 铸铁和铸钢的热处理 ..... | ( 173 ) |
| 一、白口铸铁的热处理 .....      | ( 173 ) |

|                        |       |
|------------------------|-------|
| 二、灰口铸铁的热处理 .....       | (174) |
| 三、可锻铸铁的热处理 .....       | (180) |
| 四、球墨铸铁的热处理 .....       | (183) |
| 五、铸钢的热处理 .....         | (194) |
| § 3—2 不锈钢的热处理 .....    | (195) |
| 一、马氏体不锈钢的热处理 .....     | (195) |
| 二、奥氏体不锈钢的热处理 .....     | (204) |
| 三、几种不锈钢种的热处理 .....     | (209) |
| 四、沉淀不锈钢的热处理 .....      | (209) |
| § 3—3 钢结硬质合金的热处理 ..... | (209) |
| 一、退火 .....             | (209) |
| 二、淬火与回火 .....          | (212) |
| § 3—4 有色金属的热处理 .....   | (221) |
| 一、铝及铝合金的热处理 .....      | (221) |
| 二、镁合金的热处理 .....        | (230) |
| 三、铜及铜合金的热处理 .....      | (232) |
| 四、钛合金的热处理 .....        | (236) |
| § 3—5 磁性材料的热处理 .....   | (241) |
| 一、软磁材料的热处理 .....       | (241) |
| 二、硬磁合金的热处理 .....       | (245) |
| 第四章 典型零件的热处理 .....     | (253) |
| § 4—1 机械零件的热处理 .....   | (253) |
| 一、零件材料和设备的选择 .....     | (253) |
| 二、零件结构形状的工艺性 .....     | (255) |
| § 4—2 冷变形模具的热处理 .....  | (297) |
| 一、冷变形模具的常用钢材 .....     | (297) |
| 二、冷变形模具的制造工艺路线 .....   | (297) |
| 三、热处理工艺 .....          | (300) |



|                           |       |
|---------------------------|-------|
| § 4—3 热锻模的热处理 .....       | (302) |
| 一、热锻模的热处理特点 .....         | (314) |
| 二、热处理工艺 .....             | (315) |
| 第五章 常见缺陷的分析和预防措施 .....    | (317) |
| § 5—1 断口的分析 .....         | (317) |
| 一、断口的宏观分析 .....           | (317) |
| 二、断口的显微分析 .....           | (320) |
| § 5—2 裂纹的分析 .....         | (323) |
| 一、裂纹的分类 .....             | (323) |
| 二、淬火裂纹的类型及其预防措施 .....     | (324) |
| 三、磨削裂纹 .....              | (324) |
| 四、线切割裂纹 .....             | (327) |
| § 5—3 零件的失效分析 .....       | (333) |
| 一、正常失效 .....              | (333) |
| 二、非正常失效 .....             | (336) |
| § 5—4 零件的金相组织缺陷分析 .....   | (336) |
| § 5—5 热处理常见疵病的分析和预防 ..... | (340) |
| 第六章 热处理的常用设备和仪表 .....     | (377) |
| § 6—1 热处理电炉 .....         | (377) |
| 一、一般热处理电阻炉 .....          | (378) |
| 二、其它热处理电炉 .....           | (389) |
| § 6—2 电热元件的选择及计算 .....    | (396) |
| 一、高电阻电热合金及其计算方法 .....     | (396) |
| 二、电热元件的结构 .....           | (400) |
| 三、表面负荷的选择 .....           | (400) |
| § 6—3 耐火、保温和炉用金属材料 .....  | (400) |
| 一、耐火材料 .....              | (403) |

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 二、保温材料 .....               | (408) |
| 三、炉用耐热金属材料 .....           | (409) |
| § 6—4 感应加热设备 .....         | (411) |
| 一、常用感应加热设备 .....           | (411) |
| 二、感应加热设备的常见故障及排除方法 .....   | (414) |
| § 6—5 常用温度测量仪表 .....       | (418) |
| 一、温度测量仪表的分类和应用 .....       | (418) |
| 二、热电偶、补偿导线和冷端补偿器 .....     | (421) |
| § 6—6 常用热处理设备的安全操作 .....   | (426) |
| 一、盐浴炉的安全操作 .....           | (426) |
| 二、电阻炉的安全操作 .....           | (427) |
| 第七章 常用热处理质量的检验方法 .....     | (428) |
| § 7—1 硬度试验 .....           | (428) |
| 一、布氏硬度 (HB) 测定法 .....      | (428) |
| 二、洛氏硬度 (HR) 测定法 .....      | (432) |
| 三、维氏硬度 (HV) 测定法 .....      | (437) |
| 四、显微硬度试验 .....             | (441) |
| 五、肖氏硬度试验 .....             | (441) |
| 六、硬度的粗略检查方法 .....          | (444) |
| 七、各种硬度值之间及硬度与强度之间的换算 ..... | (444) |
| § 7—2 钢的火花鉴别 .....         | (447) |
| 一、碳素钢的火花特征 .....           | (448) |
| 二、常用合金元素对火花的影响 .....       | (450) |
| 三、常用钢的火花图谱 .....           | (454) |
| § 7—3 金相检验 .....           | (458) |
| 一、金相检验规程 .....             | (458) |
| 二、几种金相检验的实例 .....          | (463) |
| § 7—4 盐溶液槽的分析方法 .....      | (505) |

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| 一、试样的选取 .....                       | (505) |
| 二、测定方法 .....                        | (505) |
| 附录一 钢号的表示方法 .....                   | (507) |
| 附录二 钢的化学成分 .....                    | (515) |
| 附录三 常用冷却介质和加热盐浴 .....               | (539) |
| 附录四 各种硬度的换算 .....                   | (543) |
| 附录五 热处理常用无机化合物和有机化合物<br>的性质 .....   | (557) |
| 附录六 热处理方法代号 .....                   | (566) |
| 附录七 火色和温度的关系 .....                  | (567) |
| 附录八 各种盐浴脱氧剂及其使用性能 .....             | (568) |
| 附录九 常用除油清洗液 .....                   | (569) |
| 附录十 温度与绝对毫伏数据对照 .....               | (570) |
| 附录十一 与国际单位制并用的单位 .....              | (571) |
| 附录十二 常用钢种的等温转变曲线图和连续转变<br>曲线图 ..... | (576) |

# 第一章 钢的热处理

热处理是一种改善金属材料及其制品（如机器零件、工具等）性能的工艺。根据不同的目的，将材料及其制件加热到适宜的温度，保温，随后用不同方法冷却，改变其内部组织（有时仅表面组织改变或表面成分改变），以获得所要求的性能。金属热处理通常分为退火（焖火）、正火（常化）、淬火、回火（配火）、时效以及化学热处理和真空热处理等。通过热处理，可以提高制件的使用效能或寿命，在某些情况下也可使较廉的一般金属材料代替较昂贵的特殊材料。

## § 1—1 钢的热处理基础

### 一、铁碳平衡图

图 1-1 称为铁碳平衡图或铁碳相图（亦称铁碳状态图）。它表示处于平衡或亚平衡状态不同成分的铁碳合金，在不同温度下的状态与组织的关系，是研究平衡状态下铁碳合金的成分、金相组织与性能的基础，说明了铁碳合金在极缓慢的加热和冷却过程中相变产物的成分、温度及其相互关系，是热处理工艺的科学依据。为了便于查阅应用，现将图中各点、线及其各种相的特性，分别列于表 1-1~1-4。

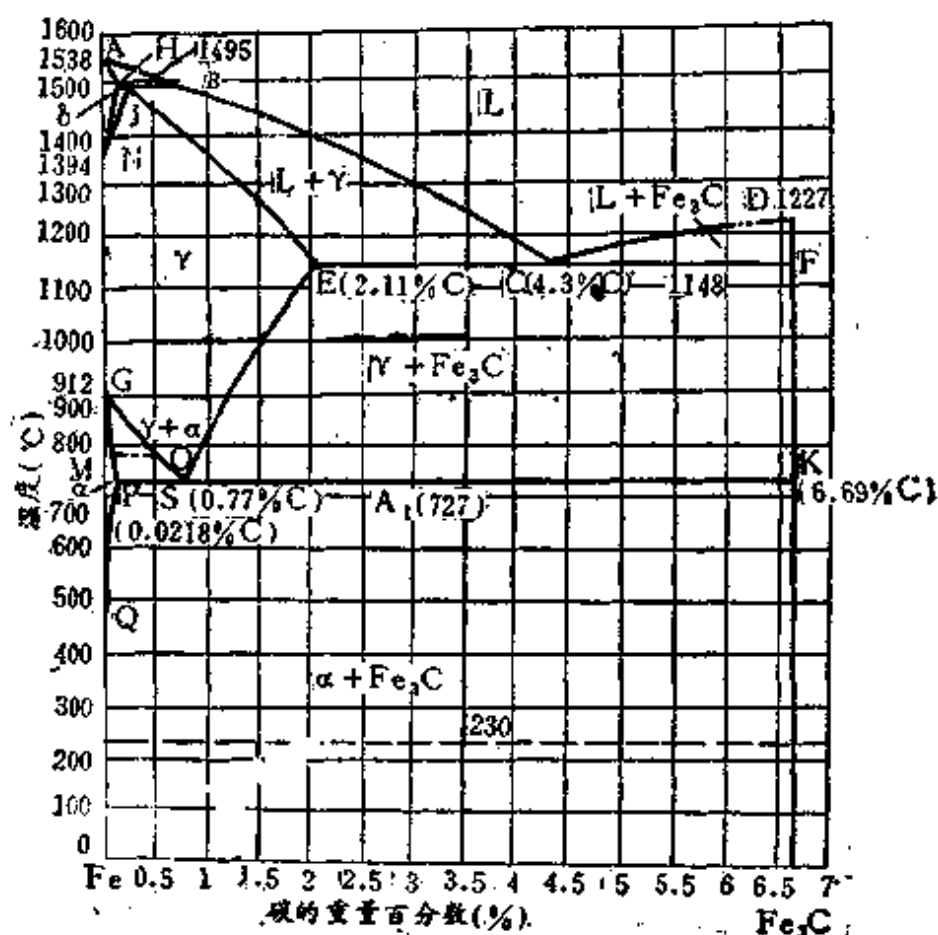


图 1-1 Fe—Fe<sub>3</sub>C 状态图

## 二、过冷奥氏体的转变

1. 等温转变 过冷奥氏体等温转变图 (简称 TTT 图) 或称奥氏体等温转变曲线 (简称 S 或 C 曲线), 是表示奥氏体化的钢在临界温度 ( $A_1$ ) 以下的不同温度保温时, 等温时间和转变量的关系, 它对制订钢的热处理工艺规程具有重要的指导意义。

图 1-2 是共析碳钢过冷奥氏体的等温转变图。它是利用试样经加热而获得奥氏体组织, 并迅速放入临界温度以下不

表 1-1

铁碳平衡图中的特性点

| 特性点 | 温度<br>(°C) | 碳含量<br>(%) | 说 明                                                       |
|-----|------------|------------|-----------------------------------------------------------|
| A   | 1538       | 0          | 纯铁熔点                                                      |
| B   | 1495       | 0.53       | 包晶转变时, 液态合金的碳浓度                                           |
| C   | 1148       | 4.30       | 共晶点 $L_c \rightleftharpoons \gamma_F + Fe_3C$             |
| D   | 1227       | 6.69       | 渗碳体( $Fe_3C$ )的熔点(理论计算值)                                  |
| E   | 1148       | 2.11       | 碳在 $\gamma$ 相中的最大溶解度                                      |
| F   | 1148       | 6.69       | 共晶转变线与渗碳体成分线的交点                                           |
| G   | 912        | 0          | $\alpha-Fe \rightleftharpoons \gamma-Fe$ 同素异构转变点( $A_3$ ) |
| H   | 1495       | 0.09       | 碳在 $\delta$ 相中的最大溶解度                                      |
| J   | 1495       | 0.17       | 包晶点 $L_B + \delta_H \rightleftharpoons \gamma_I$          |
| K   | 727        | 6.69       | 共析转变线与渗碳体成分线的交点                                           |
| M   | 770        | 0          | $\alpha$ 相磁性转变点( $A_2$ )                                  |
| N   | 1394       | 0          | $\gamma-Fe \rightleftharpoons \delta-Fe$ 同素异构转变点( $A_4$ ) |
| O   | 770        | ~0.5       | $\alpha$ 相磁性转变点( $A_2$ )                                  |
| P   | 727        | 0.0218     | 碳在 $\alpha$ 相中的最大溶解度                                      |
| Q   | ~600       | ~0.005     | 碳在 $\alpha$ 相中的溶解度                                        |
| S   | 727        | 0.77       | 共折点 $\gamma_S \rightleftharpoons \alpha_F + Fe_3C$        |

同温度的热浴中, 在每一温度作不同时间的停留, 使奥氏体发生转变; 同时将测定的每一温度转变开始和终止的时间, 分别记入温度 and 时间的坐标上, 最后用曲线连接起来而得到的。当钢的成分、奥氏体化条件、形变和应力状态不同时, 过冷奥氏体等温转变图的形状和在温度—时间坐标中的位置有很大差异。但是, 转变的规律则大致相同, 都有三个等温转变区, 即高温为珠光体转变区(共析钢为  $A_1 \sim 550^\circ\text{C}$  左右), 中温为贝氏体转变区(共析钢为  $550^\circ\text{C} \sim M_s$ , 其中在  $550 \sim$

表 1-2

铁碳平衡图中的特性线

| 特 性 线  | 说 明                                                                                    |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| AB     | $\delta$ 相的液相线                                                                         |
| BC     | $\gamma$ 相的液相线                                                                         |
| CD     | $\text{Fe}_3\text{C}$ 相的液相线                                                            |
| AH     | $\delta$ 相的固相线                                                                         |
| JE     | $\gamma$ 相的固相线                                                                         |
| HN     | 碳在 $\delta$ 相中的溶解度线                                                                    |
| JN     | $(\delta + \gamma)$ 相区与 $\gamma$ 相区分界线                                                 |
| GP     | 高于 $A_1$ 时, 碳在 $\alpha$ 相中的溶解度线                                                        |
| GOS    | 亚共析铁碳合金的上临界点( $A_3$ )                                                                  |
| ES     | 碳在 $\gamma$ 相中的溶解度线, 过共析铁碳合金的上临界点( $A_{cm}$ )                                          |
| PO     | 低于 $A_1$ 时, 碳在 $\alpha$ 相中的溶解度线                                                        |
| HJB    | $\gamma_1 \rightleftharpoons L_2 + \delta_H$ 包晶转变线                                     |
| ECF    | $L_c \rightleftharpoons \gamma_2 + \text{Fe}_3\text{C}$ 共晶转变线                          |
| MO     | $\alpha$ 铁磁性转变线( $A_2$ )                                                               |
| PSK    | $\gamma_2 \rightleftharpoons \alpha_F + \text{Fe}_3\text{C}$ 共析反应线, 铁碳合金的下临界点( $A_1$ ) |
| 230°C线 | $\text{Fe}_3\text{C}$ 的磁性转变线( $A_0$ )                                                  |

注: 临界点的位置随加热和冷却的速度不同而不同, 为了区别, 在加热时的临界点符号的右下面加一个小写英文字母“c”字, 即:  $A_{c1}$ 、 $A_{c3}$ 、 $A_{ccm}$ ; 在冷却时的临界点符号的右下面加一个小写英文字母“r”, 即:  $A_{r1}$ 、 $A_{r3}$ 、 $A_{rcm}$ 。

400°C形成上贝氏体, Bc; 400°C~Ms形成下贝氏体, Bd; 低温为马氏体转变区(Ms~Mz); 过冷奥氏体在珠光体和贝氏体等温转变前也都有一个孕育期, 即奥氏体亚稳定区; 新相的形成都是生核长大的过程; 马氏体转变一般都是降温定区转变, 即由 Ms (马氏体转变开始温度) 向下, 随温度的下降

表 1-3

铁碳平衡图中的各相区

| 图中的区域       | 说 明                |
|-------------|--------------------|
| ABCD 线以上的区域 | 均匀的液态铁碳合金          |
| ABH 区域      | 液态合金+ $\delta$ 固溶体 |
| BCEJ 区域     | 液态合金+奥氏体           |
| DCF 区域      | 液态合金+渗碳体           |
| AHN 区域      | $\delta$ 固溶体       |
| HJN 区域      | $\delta$ 固溶体+奥氏体   |
| NJESG 区域    | 奥氏体                |
| EFGS 区域     | 奥氏体+渗碳体            |
| GSP 区域      | 奥氏体+铁素体            |
| QPG 区域      | 铁素体                |
| PKLQ 区域     | 铁素体+渗碳体            |

马氏体转变量增加，至  $M_z$  (马氏体转变终止温度) 停止转变。此外，含碳量大于 0.3~0.4% 的钢，马氏体转变不能进行到底，常有数量不等的残余奥氏体存在。

影响奥氏体等温转变的因素较多，主要有如下几个方面：

① 碳的影响。在正常加热条件下，亚共析钢的 S 曲线随含碳量的增加向右移动；过共析钢的 S 曲线中，珠光体转变线随含碳量的增加向左移，而贝氏体转变线则向右移（若加热温度高于  $A_{c1}$ ，则含碳量的增加使 S 曲线右移）。 $M_s$  和  $M_z$  点随含碳量的增加而降低。

② 合金元素的影响。各种常用合金元素对等温转变曲线的影响如图 1-3 所示。此外，在钢（如含碳 0.35%）中加入少量某一合金元素时，对等温转变的影响往往不大。如果两种



表 1-4

铁碳平衡图中各相的特性

| 名 称          | 符 号                   | 晶体结构 | 说 明                                      |
|--------------|-----------------------|------|------------------------------------------|
| 铁素体          | $\alpha$              | 体心立方 | 碳在 $\alpha$ -Fe 中的间隙固溶体, 以 F 表示          |
| 奥氏体          | $\gamma$              | 面心立方 | 碳在 $\gamma$ -Fe 中的间隙固溶体, 以 A 表示          |
| $\delta$ 铁素体 | $\delta$              | 体心立方 | 碳在 $\delta$ -Fe 中的间隙固溶体, 又称高温 $\alpha$ 相 |
| 渗碳体          | $\text{Fe}_3\text{C}$ | 正交系  | 是一种复杂的化合物, 又称为 Q 碳化物                     |
| 液 相          | L                     |      | 碳在铁中的液相                                  |

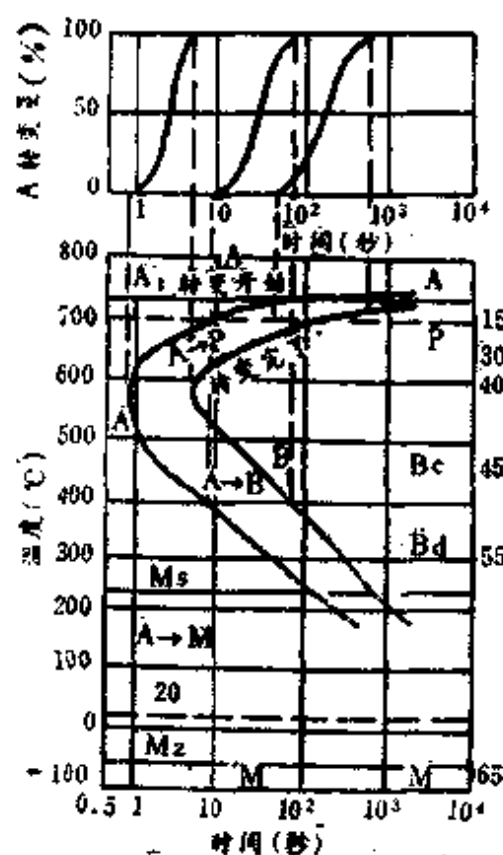


图 1-2 共析碳钢的等温转变图

体化的钢以不同冷却速度连续冷却时, 其组织转变开始及终

或多种合金元素适当搭配同时加入钢中, 可使过冷奥氏体的扩散型转变显著推迟。

③ 奥氏体化条件的影响。奥氏体化温度的提高和保温时间的延长, 可使 S 曲线右移、 $M_s$  点升高。

④ 应力及形变的影响。对过冷奥氏体进行拉伸变形, 可使 S 曲线右移。在低于或高于  $M_s$  点温度下进行小量塑性变形, 可使  $M_s$  点提高。

2. 连续冷却转变 过冷奥氏体的连续冷却转变图 (简称 CCT 图), 它是反映经奥氏