

金
属
学
与
热
处
理
下
册

高等学校试用教材

金属学与热处理

热加工专业用

下 册

河北工学院王健安 主编

机械工业出版社

高等学校试用教材

金属学与热处理

(热加工专业用)

下 册

河北工学院 王健安 主编



机械工业出版社

1046/13

金属学与热处理

(热加工专业用)

下 册

河北工学院 王健安 主编

(重排本)

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张 $16 \frac{3}{4}$ ·字数 387 千字

1980年7月重庆第一版·1984年5月重庆第五次印刷

印数 50,801—59,300·定价 1.75元

*

统一书号: 15033·4868

前 言

本书是根据第一机械工业部 1978 年 6 月在西安召开的高等工科院校“金属材料及热处理专业教材编审会议”审定的机械类热加工专业用《金属学与热处理》教学大纲编写的。

本书内容主要包括：金属及合金的结构与结晶；金属的塑性变形与再结晶；钢的热处理原理及工艺；常用金属材料等。本书分上、下两册出版，上册为金属学部分，下册为热处理及金属材料部分。本书可作为高等工科院校机械类各热加工专业（焊接、锻压、铸造）的教学用书，也可供有关专业的工程技术人员参考。

本书第一章、第二章和第七章、第八章由河北机电学院王万祥编写；第三章和第九章由河北工学院王健安编写；第四章和第五章由华南工学院阎善仪编写；第六章由东北重机学院崔明勋编写；第十章由哈尔滨工业大学石宏欢编写；第十一章由哈尔滨工业大学吴忍畊和李仁顺编写。全书由王健安主编，由崔明勋主审。

目 录

第七章 钢的热处理原理	1
§ 7-1 引言	1
一、热处理概述	1
二、钢的临界温度	1
§ 7-2 钢在加热时的转变	2
一、共析钢的奥氏体化过程	2
二、影响奥氏体化的因素	4
三、非共析钢的奥氏体化过程	6
四、奥氏体晶粒的长大	7
§ 7-3 钢在冷却时的转变	11
一、冷却条件对钢性能的影响	11
二、过冷奥氏体等温转变曲线 (C-曲线)	11
三、影响过冷奥氏体等温转变的因素	14
四、过冷奥氏体在连续冷却中的转变	18
§ 7-4 珠光体转变	24
一、片状珠光体的形成	24
二、粒状珠光体的形成	25
三、珠光体的组织和性能	26
§ 7-5 马氏体转变	28
一、马氏体的组织、结构和性能	28
二、马氏体转变的特点	34
§ 7-6 贝氏体转变	42
一、贝氏体的组织组性能	42
二、贝氏体转变的热力学	44
三、贝氏体的形成过程	45
四、魏氏组织的形成	46
§ 7-7 钢在回火时的转变	47
一、淬火状态钢的不稳定性	47
二、淬火钢在回火过程中的转变	48
三、回火转变产物的组织和性能	54
四、回火脆性	56
第八章 钢的热处理工艺	58
§ 8-1 钢的加热	58
一、加热的目的和要求	58
二、如何确定合理的加热工艺	58
三、加热缺陷及防止	59
§ 8-2 钢的退火与正火	61

一、钢的退火·····	61
二、钢的正火·····	67
§ 8-3 钢的淬火与回火·····	68
一、钢的淬火·····	68
二、钢的回火·····	85
§ 8-4 钢的形变热处理·····	88
§ 8-5 钢的表面淬火·····	89
一、感应加热表面淬火·····	90
二、火焰加热表面淬火·····	92
§ 8-6 钢的化学热处理·····	92
一、化学热处理的基本过程·····	93
二、钢的渗碳·····	94
三、钢的氮化·····	99
四、钢的氰化(碳氮共渗)·····	101
五、钢的软氮化·····	103
六、渗硼、渗铝简介·····	103
第九章 工业用钢·····	105
§ 9-1 钢的分类及编号·····	105
一、钢的分类·····	105
二、钢的编号·····	106
§ 9-2 钢中的各种元素·····	110
一、钢中的杂质·····	110
二、钢中的合金元素·····	111
§ 9-3 结构钢·····	128
一、普通结构钢·····	128
二、优质结构钢·····	133
§ 9-4 工具钢·····	153
一、刃具钢·····	154
二、模具钢·····	164
三、量具钢·····	173
§ 9-5 特殊性能钢·····	174
一、不锈钢·····	174
二、耐热钢·····	179
三、耐磨钢·····	187
第十章 铸铁·····	194
§ 10-1 灰口铸铁·····	194
一、铁碳双重状态图及石墨化过程·····	194
二、影响石墨化的因素·····	198
三、灰口铸铁的成分、组织和性能·····	201
四、灰口铸铁的孕育处理·····	203
五、灰口铸铁的热处理·····	204
六、激冷铸铁·····	204

§ 10-2 可锻铸铁	205
一、可锻铸铁的组织、性能及用途	205
二、可锻铸铁的生产	206
三、缩短退火周期的途径	208
§ 10-3 球墨铸铁	209
一、球墨铸铁的获得方法	210
二、球墨铸铁的组织性能	213
三、球墨铸铁的热处理	215
§ 10-4 合金铸铁简介	219
一、耐磨铸铁	219
二、耐热铸铁	220
三、耐蚀铸铁	222
第十一章 有色金属及其合金	223
§ 11-1 铝及铝合金	223
一、纯铝及其合金的性能特点	223
二、二元铝合金	224
三、铝合金的时效硬化	231
四、硬铝合金	233
五、锻铝合金	236
六、超硬铝合金	238
七、铸造铝合金	240
§ 11-2 钛及钛合金	242
一、钛的性质	243
二、钛合金	243
三、钛合金的热处理	246
§ 11-3 铜及铜合金	249
一、纯铜	249
二、铜合金的分类及编	250
三、黄铜	250
四、青铜	252
§ 11-4 轴承合金	257
一、轴承合金的性能要求	257
二、锡基轴承合金	257
三、铅基轴承合金	258
四、铜基轴承合金	259
五、铝基轴承合金	260

第七章 钢的热处理原理

§ 7-1 引 言

一、热处理概述

热处理是一种重要的金属加工工艺，在机械制造业中被广泛地应用着。例如，在机床制造中，百分之六十~七十的零件都要经过热处理。在汽车、拖拉机制造中，百分之七十~八十的零件都要进行热处理。至于工模具和滚动轴承等等，则要百分之百地进行热处理。总之，重要零件都须经适当的热处理才能使用。随着工业的不断发展，热处理将发挥更大的作用。

钢的热处理的工艺特点是，把钢在固态下加热到预定的温度，保温预定的时间，然后以预定的方式冷却下来。通过这样一个工艺过程，使钢的性能发生预期的变化。

热处理的主要目的在于改变钢的性能，即改善钢的工艺性能和提高钢的使用性能。例如，用高速钢制造钻头，必先经过热处理，降低钢材硬度，才能进行切削加工。加工成钻头以后，又必须进行热处理，提高钻头的硬度和耐磨性，才能用以钻削其他金属。可见，同一个高速钢，前后的性能要求是完全不同的，这只有通过不同的热处理才能解决。

钢的组织决定钢的性能。热处理改变钢的性能，是通过改变钢的组织来实现的。钢在固态加热、保温和冷却过程中，会发生一系列组织转变。这些转变具有严格的规律性，在一定的温度、时间、介质条件下，必然形成一定的组织，具有一定的性能。在不同条件下则会形成不同的组织，具有不同的性能。如果钢中不存在这些固态相变，也就不可能进行热处理。

钢中组织转变的规律，就是热处理的原理。根据热处理原理制订的温度、时间、介质等等参数，就是热处理工艺。

二、钢的临界温度

在前面学习Fe-C合金状态图时已经知道，碳素钢在加热和冷却过程中，经过 PSK 线(A_1 线)时会发生珠光体与奥氏体之间的相互转变；经过 GS 线(A_3 线)时会发生铁素体与奥氏体之间的相互转变；经过 ES 线(A_{cm} 线)时会发生渗碳体与奥氏体之间的相互转变。

因此，任一含碳量的碳素钢，在缓慢加热和冷却过程中其固态组织转变的临界点，都可根据Fe-C合金状态图上的 A_1 线、 A_3 线和 A_{cm} 线来确定。共析钢只有一个临界点，就是 A_1 点；亚共析钢则有两个临界点： A_1 点和 A_3 点；过共析钢也有两个临界点： A_1

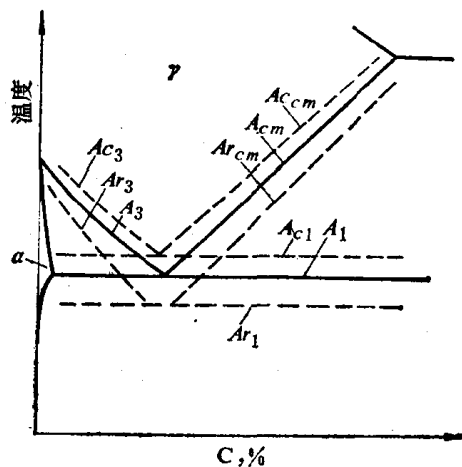


图7-1 碳素钢的临界点在Fe-C合金状态图上的位置

点和 A_{cm} 点。有时也称 A_1 点为下临界点，称 A_3 点和 A_{cm} 点为上临界点。

应当指出， A_1 、 A_3 和 A_{cm} 点都是平衡临界点，都是新相与旧相自由能相等的温度。实际转变过程不可能在平衡临界点进行。加热转变只有在平衡临界点以上才能进行，同理，冷却转变只有在平衡临界点以下才能进行。所以，实际的加热转变点和冷却转变点都偏离平衡临界点。而且，加热和冷却的速度越大，其偏离也越大。为了区别于平衡临界点，通常将加热转变点标以“c”，冷却转变点标以“r”。碳素钢的这些临界点在 Fe-C 合金状态图上的位置示于图 7-1。这几个实际转变点的物理意义如下：

Ac_1 ：加热时珠光体向奥氏体转变的开始温度。

Ar_1 ：冷却时奥氏体向珠光体转变的开始温度。

Ac_3 ：加热时游离铁素体全部转变为奥氏体的终了温度。

Ar_3 ：冷却时奥氏体开始析出游离铁素体的温度。

Ac_{cm} ：加热时二次渗碳体全部溶入奥氏体的终了温度。

Ar_{cm} ：冷却时奥氏体开始析出二次渗碳体的温度。

还应指出，工业碳素钢并不是纯的 Fe-C 合金，里面还含有硅、锰、硫、磷等杂质。这些杂质元素对于碳素钢的平衡临界点是有影响的，不过，由于含量很少，影响不大，一般不超过工业控温的精度范围，因而可以忽略不计，仍以 Fe-C 合金状态图来确定碳素钢的临界点。对于合金钢由于合金元素对平衡临界点有很大影响，甚至会大大改变相图的结构，使 A_1 、 A_3 、 A_{cm} 点不再是一个恒定温度，而变成一个温度区间，这时就不能再用 Fe-C 合金状态图来确定合金钢的临界点，而必须依据三元或多元相图才行。常用钢种在缓慢加热和冷却时的转变点可在合金钢手册中查到。目前也有一些计算临界点的经验公式，但精确度都不高。

§ 7-2 钢在加热时的转变

热处理的第一道工序都是加热，但是有两种本质不同的加热：一种是临界点 A_1 以下的加热，另一种是临界点 A_1 以上的加热。在这两种加热条件下发生的转变是不同的。本节所讲的是，钢在加热到 A_1 点以上时所发生的转变。

由 Fe-C 合金状态图可知，任何成分的碳素钢加热到 A_1 点以上时，都会发生珠光体向奥氏体的转变；加热到 A_3 点或 A_{cm} 点以上时，便全部转变成奥氏体。热处理时进行 A_1 点以上加热的目的，就是为了得到奥氏体。通常把这种加热转变过程称为“奥氏体化”。

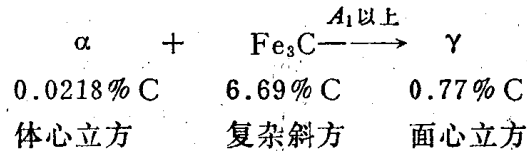
奥氏体是碳在 γ -Fe 中的间隙固溶体，具有面心立方晶格，塑性很好，容易变形。奥氏体冷却时在不同过冷度下会发生不同的转变，形成不同的组织，具有不同的性能。所以，一般热处理时都要首先加热得到奥氏体，然后再在一定过冷度下形成所需的组织。

一、共析钢的奥氏体化过程

共析钢在室温的平衡组织是单一珠光体，加热到 A_1 点以上全部转变成奥氏体。

珠光体是铁素体和渗碳体的两相混合物，其中，铁素体是基体相，具有体心立方晶格，含碳极微，在 A_1 点时仅含 0.0218% C；渗碳体是分散相，具有复杂斜方晶格，含碳很高（6.69% C）。珠光体的平均含碳量为 0.77%。在 A_1 点以上，珠光体便转变成含

0.77% C 的面心立方晶格的奥氏体，这一转变过程可以用下列反应式来表示：



由上式可以看出，珠光体向奥氏体的转变，是由成分相差悬殊、晶格截然不同的两相，变成另一种晶格的单相均匀固溶体。因此，在转变过程中必须进行碳原子和铁原子的扩散，必须进行铁原子的晶格改组，即发生相变。

奥氏体的形成是以形核与长大的方式逐渐进行的，其转变过程如图 7-2 所示。

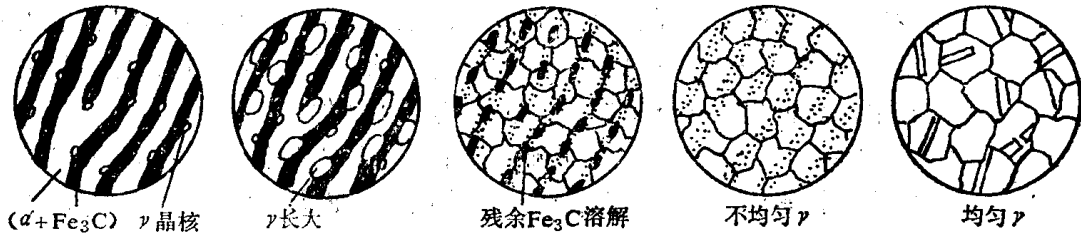


图7-2 珠光体向奥氏体转变过程示意图

珠光体向奥氏体转变可分为三个阶段：

第一阶段：奥氏体的形核与长大。珠光体加热到 A_1 点以上，经过一段孕育期，首先在铁素体和渗碳体的相界面上形成奥氏体晶核，然后晶核向铁素体和渗碳体两方面长大。与此同时，又有新的奥氏体晶核在其他相界面上形成，并随之长大。直到各个奥氏体晶粒都彼此相遇，珠光体消失，这一阶段便告结束。

研究表明，在加热速度不太快的条件下，奥氏体晶核总是优先在铁素体和渗碳体的相界面上形成。这是因为，奥氏体形核时，也象液态结晶形核时一样，需要一定的结构起伏和能量起伏，此外，还需要一定的浓度起伏。在相界面上，原子排列不很规则，处于能量较高状态，因此，出现形核所需的结构起伏和能量起伏的几率也大。同时，奥氏体的碳浓度介于铁素体和渗碳体之间，故在这两相的界面上也容易出现形核所需的浓度起伏。所以，奥氏体晶核优先在相界面上形成。

奥氏体晶核的长大机理示于图 7-3。当奥氏体晶核在铁素体和渗碳体的相界面上形

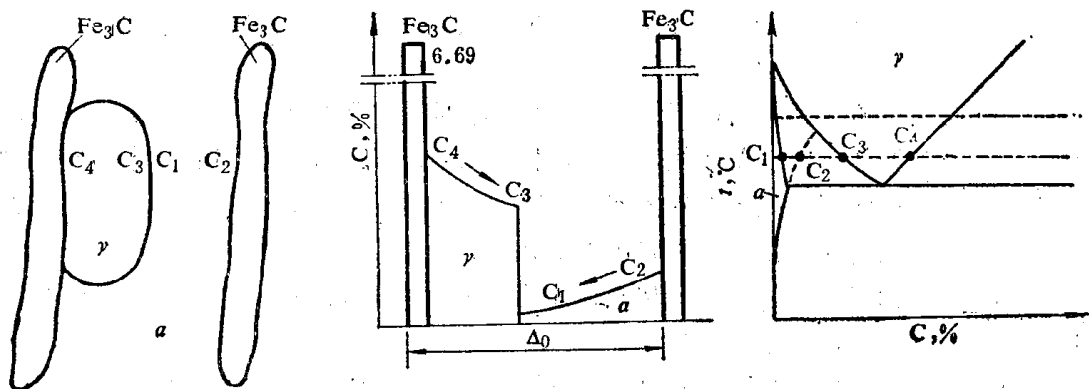


图7-3 奥氏体的长大机理示意图

成时, 奥氏体与铁素体和渗碳体便建立起界面浓度平衡, 这是系统自由能最低的状态。这些界面平衡浓度可由 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 状态图确定, 如图 7-3 所示。这时, 在奥氏体中和铁素体中都出现浓度差, 碳原子必然由高浓度处向低浓度处扩散。扩散的结果使 C_2 、 C_4 降低, 而使 C_1 、 C_3 升高, 从而破坏了界面平衡, 使系统自由能升高。这又促使渗碳体逐渐溶解, 提高 C_2 、 C_4 , 同时促使 $\alpha \rightarrow \gamma$ 转变, 降低 C_1 、 C_3 , 维持界面平衡, 降低系统自由能。这样, 由于碳的扩散, 不断打破界面平衡, 又通过渗碳体和铁素体向奥氏体转变来维持界面平衡, 如此反复进行下去, 就使相界面不断地向铁素体和渗碳体中扩展, 奥氏体便逐渐长大。

研究发现, 奥氏体晶核长大时, 向铁素体方面的长大总是快于向渗碳体方面的长大, 而且, 转变温度越高, 这两个方面长大的速度相差越大。这是因为, 奥氏体的长大速度与界面浓度差有关, 并受碳的扩散所控制。在奥氏体长大过程中, 渗碳体溶解所提供的碳原子, 都通过扩散, 转而用于 $\alpha \rightarrow \gamma$ 转变。碳在 γ/α 界面的浓度差 ($C_3 - C_1$) 远小于 $\gamma/\text{Fe}_3\text{C}$ 界面的浓度差 ($6.69 - C_4$)。在平衡条件下, 一份渗碳体溶解将促使几份铁素体转变, 所以奥氏体向铁素体方面长大总是快于向渗碳体中长大。由图 7-3 可见, 温度越高, γ/α 界面浓度差越小, 而 $\gamma/\text{Fe}_3\text{C}$ 界面浓度差变化不大, 因而, 向铁素体方面长大越快于向渗碳体中长大。所以, 在奥氏体化第一阶段结束时, 总是铁素体先消失, 并有一部分渗碳体颗粒残留在奥氏体中, 这时奥氏体的平均碳浓度低于共析成分。奥氏体化温度越高, 则铁素体消失得越快, 残余的渗碳体越多, 奥氏体的平均碳浓度越低。实验测得, 奥氏体化第一阶段刚刚结束时, 奥氏体的平均碳浓度变化如下: 735°C 为 $0.77\% \text{C}$, 760°C 为 $0.69\% \text{C}$, 780°C 为 $0.61\% \text{C}$, 850°C 为 $0.51\% \text{C}$, 900°C 为 $0.46\% \text{C}$ 。

第二阶段: 残余渗碳体的溶解。残留在奥氏体中的渗碳体颗粒, 通过碳原子的扩散, 逐渐溶入奥氏体, 使奥氏体的碳浓度逐渐趋近共析成分。一旦渗碳体全部消失, 这一阶段便结束。

第三阶段: 奥氏体的均匀化。当残余渗碳体溶解刚完毕时, 奥氏体的成分是不均匀的, 在原来是渗碳体的地方, 碳浓度仍较高, 而原来是铁素体的地方, 碳浓度仍较低。只有经过长时间的碳原子扩散, 才能使奥氏体逐渐趋于均匀化, 最后得到单相均匀的奥氏体。到此, 奥氏体化过程便全部完成。

二、影响奥氏体化的因素

奥氏体的形成是依靠原子的扩散, 通过形核与长大过程进行的。凡是影响扩散, 影响形核与长大的因素, 都会影响奥氏体的形成速度。主要的影响因素如下。

(一) 加热温度和保温时间的影响

图 7-4 是实验测得的共析碳钢的等温奥氏体化曲线。图中左边第一条曲线表示珠光体向奥氏体转变开始, 第二条曲线表示奥氏体化第一阶段完成, 得到奥氏体和残余渗碳体组织。第三条曲线表示残余渗碳体溶解完毕, 得到成分不均匀的奥氏体。第四条曲线表示奥氏体已经均匀化。由图可以看出以下几点:

1. 加热温度必须高于 A_1 点, 珠光体才能向奥氏体转变。转变需要经过一段孕育期以后才开始。温度越高, 孕育期越短。

2. 转变温度越高, 奥氏体的形成速度越快, 转变所需时间越短。这是两方面原因造成的: 一方面, 温度越高则奥氏体与珠光体的自由能差越大, 转变的推动力越大; 另

一方面，温度越高则原子扩散越快，因而碳的重新分布与铁的晶格改组都快。所以，转变温度越高，奥氏体的形核与长大、渗碳体的溶解及奥氏体的均匀化都进行得越快。

3. 同样一个奥氏体化状态，既可以通过较低温度较长时间的加热得到，也可以通过较高温度较短时间的加热得到。如图 7-4 所示，共析碳钢经过 840℃、10 秒加热，与经过 740℃、1000 秒加热所得到的组织状态相同。所以，在制订加热工艺时，应当全面地考虑温度和时间的影响。

(二) 加热速度的影响

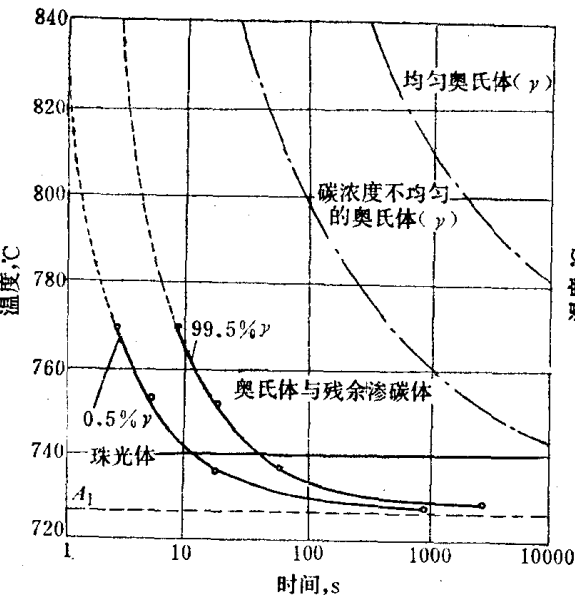


图7-4 共析碳钢的等温奥氏体化曲线

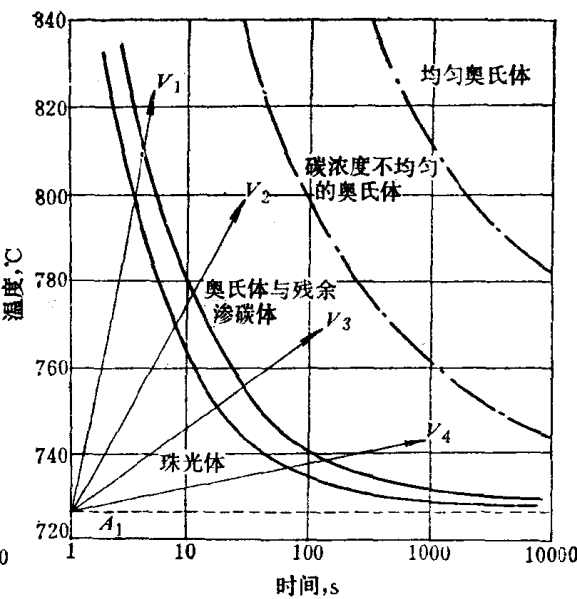


图7-5 共析碳钢的连续加热奥氏体化曲线

在连续升温加热时，加热速度对于奥氏体化过程有重要影响。图 7-5 是共析碳钢的连续加热奥氏体化曲线。图中各曲线的意义与图 7-4 相同。由图可见，加热速度越快，则珠光体的过热度越大，转变的开始温度 Ac_1 越高，终了温度也越高。转变过程是在一个温度区间内完成的。可是，加热速度越快，则转变的孕育期越短，转变所需的时间也越短。

表 7-1 列出实验测得的共析碳钢的 Ac_1 点与加热速度的关系。

表7-1 共析碳钢的 Ac_1 点与加热速度的关系

加 热 速 度, $^{\circ}\text{C}/\text{s}$	20	100	300	700	1700	3000
转 变 点 $Ac_1, ^{\circ}\text{C}$	760	780	800	820	840	860

(三) 合金元素的影响

钢中加入合金元素，并不改变珠光体向奥氏体转变的基本过程。但是，合金元素对于奥氏体化三阶段的进行速度有重要影响，一般都使之减慢。合金元素影响的原因如下：

1. 合金元素会改变钢的平衡临界点。如：镍、锰、铜等都使临界点降低，而铬、钼、钨、钒、硅等则使之升高。因此，在同一温度奥氏体化时，与碳素钢相比合金元素改变了过热度，因而也就改变了奥氏体与珠光体的自由能差，这对于奥氏体的形核与长大都有重要影响。

2. 合金元素在珠光体中的分布是不均匀的。如：铬、钼、钨、钒、钛等能形成碳化物的元素，主要存在于共析碳化物中，镍、硅、铝等不形成碳化物的元素，主要存在于共析铁素体中。因此，合金钢奥氏体化时，除了必须进行碳的扩散重新分布外，还必须进行合金元素的扩散重新分布。可是，合金元素的扩散速度比碳原子要慢得多，所以合金奥氏体的均匀化要缓慢得多。

3. 某些合金元素会影响碳和铁的扩散速度。如铬、钼、钨、钒、钛等都显著减慢碳的扩散，钴、镍等则加速碳的扩散，硅、铝、锰等影响不大。

4. 强烈形成碳化物的元素，如钛、钒、锆、铌、钼、钨等，会形成特殊碳化物，其稳定性比 Fe_3C 高，很难溶入奥氏体，必须进行较高温度较长时间加热才能完全溶解。

总之，合金钢的奥氏体化速度一般都比碳素钢慢，特别是高合金钢更要慢得多。

(四) 原始组织的影响

图 7-6 是不同原始组织的共析碳钢的等温奥氏体化曲线。每组曲线的左边一条是转变开始线，右边一条是转变终了线。由图可见，奥氏体化最快的是原为淬火状态的钢，其次是正火状态的钢，最慢的是球化退火状态的钢。这是因为，淬火状态的钢在 A_1 点以下升温过程中已经分解成微细粒状珠光体，组织最弥散，相界面最多，最有利于奥氏体的形核与长大，所以转变最快。正火状态的细片状珠光体，其相界面积也很大，所以转变也很快。球化退火状态的粒状珠光体，相界面积最小，因此奥氏体化最慢。总之，原始组织越弥散，奥氏体化速度越快。

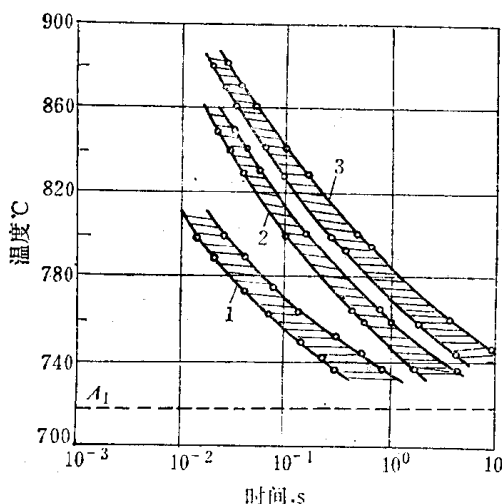


图7-6 不同原始组织的共析碳钢的等温奥氏体化曲线

1—淬火状态 2—正火状态 3—球化退火状态

三、非共析钢的奥氏体化过程

亚共析钢和过共析钢统称为非共析钢。由 Fe-C 合金状态图可知，非共析钢与共析钢的组织不同之处在于，除了珠光体之外，还有一部分先共析相：在亚共析钢中是自由铁素体，在过共析钢中是二次渗碳体。因此，非共析钢的奥氏体化要分两步来完成：第一步完成珠光体的奥氏体化，第二步完成先共析相的奥氏体化，如图 7-7 所示。由图可见，亚共析钢加热到 A_1 点以上，珠光体首先变成奥氏体，随后，在 A_1 至 A_3 的升温过

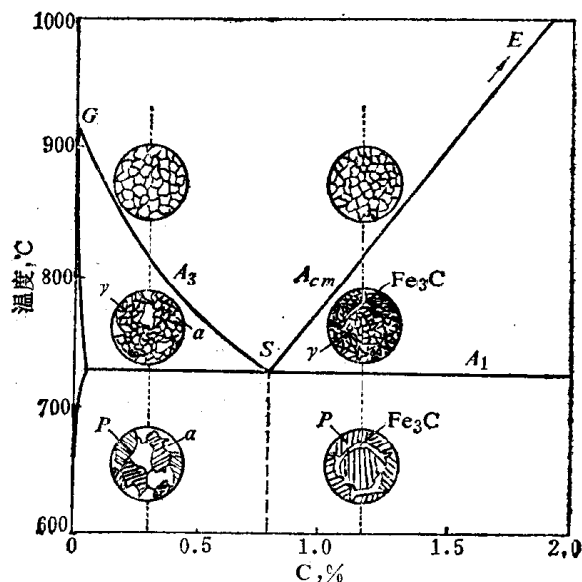


图7-7 亚共析钢和过共析钢的奥氏体化过程示意图

程中，自由铁素体逐渐变成奥氏体。当温度超过 A_3 点时，转变全部完成，得到单相奥氏体，过共析钢与此相似，加热到 A_1 点以上，完成珠光体的奥氏体化；加热到 A_{cm} 点以上，完成二次渗碳体的奥氏体化。

可见，亚共析钢和过共析钢必须加热到上临界点以上，才能全部完成奥氏体化，得到单相奥氏体组织。这种加热称为“完全奥氏体化”。如果是在上、下临界点之间加热，便会得到二相组织，除了奥氏体之外，还有一部分尚未转变的先共析相。这种加热称为“不完全奥氏体化”。

钢的含碳量对于非共析钢的奥氏体化速度有很大影响。钢中含碳越多，则奥氏体化速度越快，如表 7-2 所示。这是因为，含碳越多，则组织中的碳化物越多，因而相界面面积越大，越有利于奥氏体的形核与长大。同时，奥氏体中碳浓度越高，碳原子和铁原子的扩散便越快，因而奥氏体的形成也越快。

表 7-2 奥氏体的形成速度与含碳量的关系

钢中含碳量，%	奥氏体化温度，℃	形成 50% 奥氏体的时间，s
0.40	740	420
0.88	740	220
1.36	740	100

四、奥氏体晶粒的长大

(一) 晶粒大小对性能的影响

奥氏体晶粒大小是评定加热质量的指标之一。因为奥氏体晶粒大小对于随后冷却时的转变，以及转变产物的性能，都有重要的影响。

图 7-8 表示出奥氏体晶粒度对于淬火低温回火钢的屈服强度的影响。可以看出，晶粒越细小则屈服强度越高， $\sigma_{0.2}$ 与 $\sqrt{d}$ 成反比，存在如下经验关系式：

$$\sigma_{0.2} = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{d}}$$

式中 σ_0 相当于单晶体的屈服强度，随温度而变化。 K 是比例系数，与晶界情况有关。

由图 7-9 可以看出，奥氏体晶粒度越细小，淬火后的冲击韧性便越高。可以说，奥氏体晶粒度对于淬火钢的冲击韧性有决定性的影响。所以，在淬火加热时，总是希望奥氏体晶粒越细小越好。

严格控制奥氏体晶粒度，在热处理生产中是一个重要的问题。凡是晶粒度超过规定尺寸的，就成为一种加热缺陷，称为“过热”，必须进行返修。重要的刀具淬火时，都要对奥氏体晶粒度进行金相评级，以保证淬火后有足够的强度和韧性。

(二) 奥氏体的晶粒度

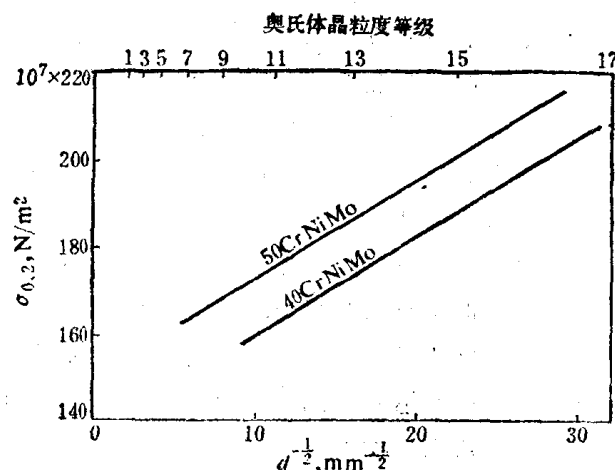


图 7-8 奥氏体晶粒直径 d 对于淬火钢屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 的影响 (淬火后于 200℃ 回火)

1. 实际晶粒度 加热时, 当珠光体刚刚转变为奥氏体时, 奥氏体的晶粒非常细小

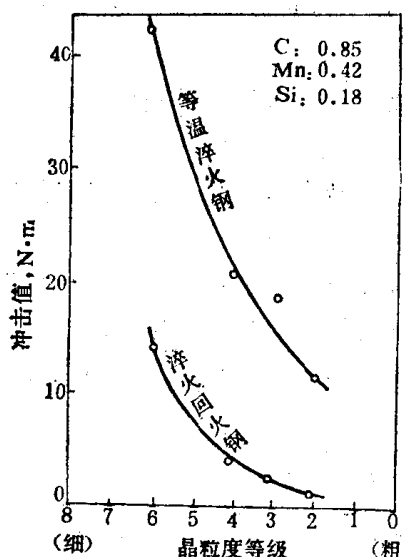


图7-9 奥氏体晶粒度对共析碳钢冲击韧性的影响 (试样 $\phi 4.5\text{mm}$, 无缺口, 热处理成HRC50)

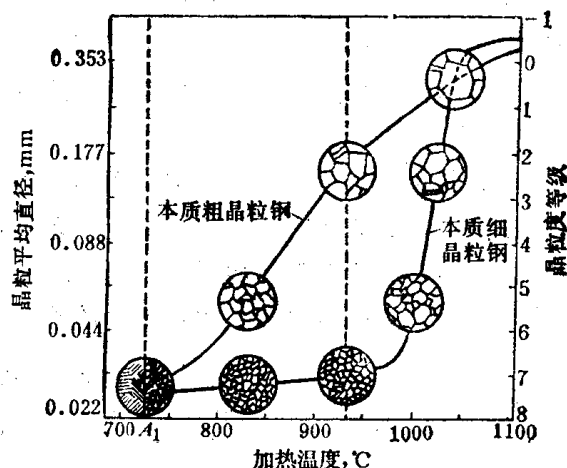


图7-10 钢的本质晶粒度示意图

而均匀, 称为奥氏体的“起始晶粒度”。加热前的原始组织越弥散, 加热速度越快, 则奥氏体的起始晶粒度越细小。

奥氏体的起始晶粒形成后, 如果继续在临界点以上升温或保温, 晶粒就会自动长大起来。这是因为, 晶粒越细小则晶界面积越大, 总的界面能也越大, 所以, 细晶粒状态的自由能高于粗晶粒状态的自由能。晶粒长大能使自由能降低, 所以晶粒总要自发长大。显然, 晶粒长大的推动力是界面能的降低, 而晶粒长大的阻力来自第二相的阻碍等作用。晶粒长大是依靠原子扩散与晶界推移, 由大晶粒吞并小晶粒而进行的。温度越高, 时间越长, 晶粒就长得越大。在每一个具体加热条件下所得到的奥氏体晶粒大小, 称为奥氏体的“实际晶粒度”。

晶粒长大以后, 在冷却时就不能再变小。只有冷却到 A_1 点以下, 使奥氏体分解成铁素体和渗碳体的二相组织, 再加热到 A_1 点以上, 重新形成奥氏体, 才能使晶粒再变小。所以, 重新奥氏体化是细化晶粒的主要手段之一。经过反复多次短时奥氏体化。就能使奥氏体晶粒越来越细小, 晶粒直径最小可达到 $0.3\mu\text{m}$, 这相当于 19 级晶粒度。这就是所谓“超细化加热”。

2. 本质晶粒度 生产中发现, 有的钢材加热时奥氏体晶粒很容易长大, 而有的钢材就不容易长大, 这说明不同的钢材的晶粒长大倾向是不同的。本质晶粒度就是反映钢材加热时奥氏体晶粒长大倾向的一个指标。凡是奥氏体晶粒容易长大的钢就称为“本质粗晶粒钢”, 反之, 奥氏体晶粒不容易长大的钢则称为“本质细晶粒钢”。这两种钢的晶粒长大倾向示于图 7-10。由图可见, 随着加热温度升高, 本质粗晶粒钢的奥氏体晶粒一直长大, 逐渐粗化。本质细晶粒钢则不然, 在一定温度以下加热时, 奥氏体晶粒长大很缓慢, 一直保持细小晶粒。可是, 超过一定温度以后, 晶粒急剧长大, 突然粗化。这个晶粒开始强烈长大的温度称为“晶粒粗化温度”。本质细晶粒钢只有在晶粒粗化温度以下加热时, 晶粒才不容易长大, 超过这一温度以后, 便与本质粗晶粒钢没有什么区别了。

本质晶粒度是根据冶金部的部颁标准 YB27-64 的规定来测定的, 即将钢在 $930 \pm 10^\circ\text{C}$ 加热, 保温 3 ~ 8 小时, 冷却后测定奥氏体晶粒度。通常是在放大 100 倍的情况下, 与标准晶粒度等级图 (图 7-11) 进行比较评级。晶粒度是 1 ~ 4 级的定为本质粗晶粒钢, 5 ~ 8 级的定为本质细晶粒钢。

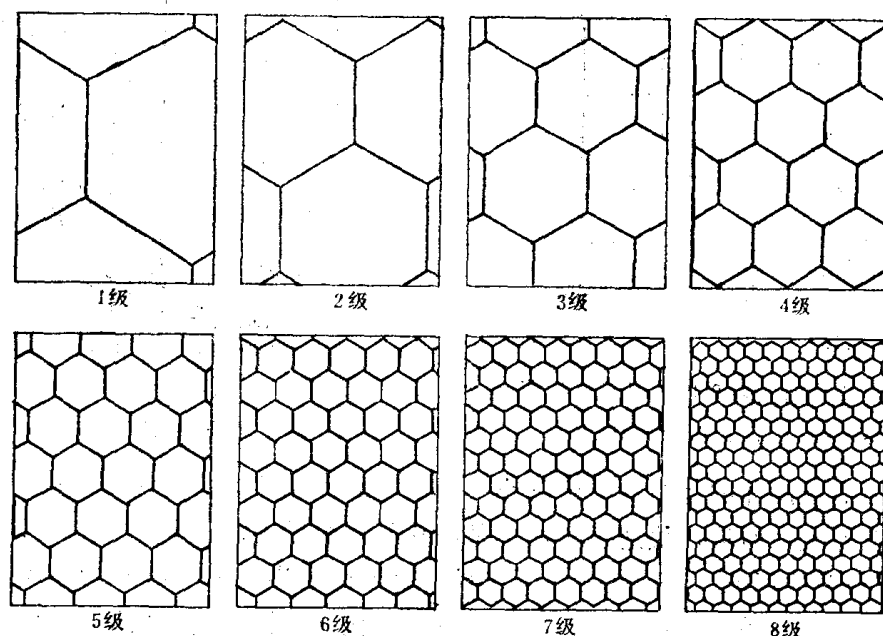


图 7-11 标准晶粒度等级示意图

钢的本质晶粒度决定于钢的成分和冶炼条件。一般用铝脱氧的钢都是本质细晶粒钢, 不用铝而用硅、锰脱氧的钢则为本质粗晶粒钢。含有钛、锆、钒、铌、钼、钨等合金元素的钢也是本质细晶粒钢。这是因为, 铝、钛、锆等元素在钢中会形成分布在晶界上的超显微的化合物颗粒, 如 AlN 、 Al_2O_3 、 TiC 、 ZrC 等, 它们稳定性很高, 不容易聚集, 也不容易溶解, 能阻碍晶粒长大。但是, 当温度超过晶粒粗化温度以后, 由于这些化合物的聚集长大, 或者溶解消失, 失去阻碍晶界迁移的作用, 奥氏体晶粒便突然长大起来。在本质粗晶粒钢中不存在这些化合物微粒, 晶粒长大不受阻碍, 从而随温度升高而逐渐粗化。

钢的本质晶粒度在热处理生产中具有很重要的意义。因为, 有些热处理工艺, 如渗碳、渗金属等工艺, 必须在高温进行长时间加热才能实现, 这时若采用本质细晶粒钢, 就能防止工件心部和表层过热, 渗后就能直接进行淬火。若用本质粗晶粒钢就会严重过热。此外, 本质细晶粒钢焊接时, 焊缝热影响区的过热程度也比本质粗晶粒钢轻微得多。

(三) 影响奥氏体晶粒度的因素

1. 加热温度和时间的影响 加热温度和时间对于奥氏体晶粒度的影响示于图 7-12。由图可见, 在每一温度加热时, 随着时间的延长, 晶粒不断长大, 但是长到一定尺寸后就几乎不再长大。加热温度越高, 晶粒长大越快, 最终尺寸也越大。反之, 温度越低, 时间越短, 晶粒就越细小。

2. 加热速度的影响 由图 7-13 可以看出, 在最高加热温度相同时, 加热速度越快, 奥氏体晶粒越细小。这是两方面原因造成的: 一方面, 加热速度越快则过热度越大, 形

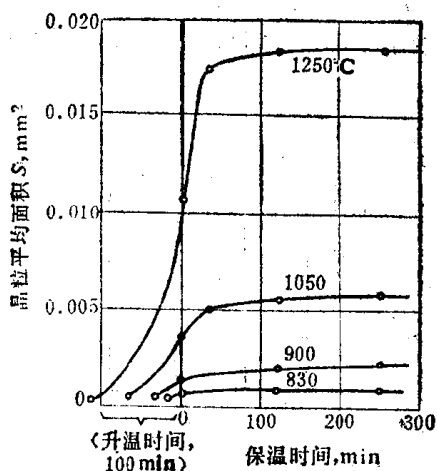


图7-12 加热温度和时间对奥氏体晶粒度的影响 (钢: 0.48%C, 0.32%Mn)

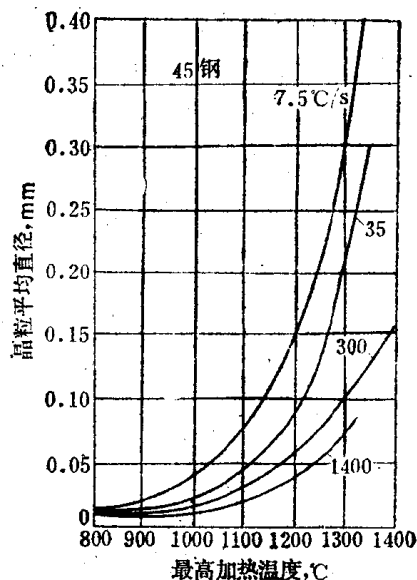


图7-13 加热速度对奥氏体晶粒度的影响

核率越高, 因而奥氏体的起始晶粒度越小; 另一方面, 加热速度越快则加热时间越短, 晶粒来不及长大。所以, 快速短时加热是细化晶粒的手段之一。

3. 钢的成分的影响 钢中含碳量对奥氏体晶粒度的影响示于图 7-14。当加热温度相同时, 钢中含碳量越低, 则奥氏体晶粒越细小。例如, 同样加热到 1300°C, 保温 3 小时, 奥氏体晶粒的平均面积在 0.24%C 钢中约为 0.01mm², 而在 0.8%C 钢中则为 0.15mm², 相差 15 倍, 可见碳的影响是很大的。图 7-14 表明, 低碳钢比高碳钢的过热倾向小得多。所以低碳钢焊接时, 尽管近缝区温度达到 1350°C 以上, 晶粒长大并不十分严重。

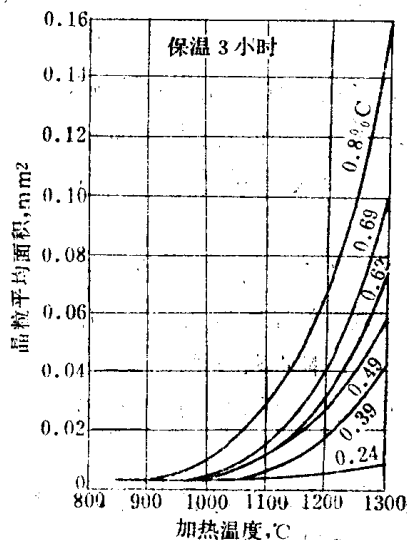


图7-14 钢中含碳量对奥氏体晶粒度的影响

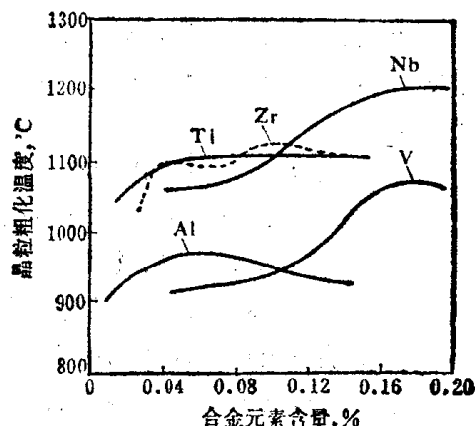


图7-15 合金元素对晶粒粗化温度的影响

合金元素对奥氏体晶粒长大的影响, 可以分述如下:

强烈阻止晶粒长大的元素有铝、钛、钒、铌、锆等。这些元素对于提高奥氏体晶粒粗化温度的作用示于图 7-15。由图可见, 铌的作用最强, 铝的作用最弱。并且, 每一元