

17.17
207

钢 及 其 热 处 理

——博 福 斯 手 册

K.E.西尔宁 著

孙一唐 刘文泉 等译

本书译自 1975 年英文版 “Steel and its Heat Treatment” 一书。内容包括钢的热处理原理、材料试验方法、合金化、淬透性等系统全面的理论阐述、也介绍了各类钢件和工具的热处理工艺以及有关零件热处理变形的丰富资料及参考数据。既有金属材料科学的现代理论，又有大量生产实际资料，全书共分八章，有插图五百余幅，表格九十余个，可供金属材料及热处理工作者以及有关院校师生参考。

钢 及 其 热 处 理

——博 福 斯 手 册

K.E. 西尔宁 著

孙一唐 刘文泉 等译

•

冶金工业出版社出版

(北京灯市口 74 号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

•

850×1168 1/32 印张 19 7/8 字数 523 千字

1982 年 4 月第一版 1982 年 4 月第一次印刷

印数 00,001~7,800 册

统一书号: 15062·3679 定价 2.45 元

目 录

1. 金相学的基本概念	1
1.1 铁的相变和晶体结构	1
1.2 铁-碳平衡图	3
1.2.1 加热	5
1.2.2 冷却	7
1.3 时间-温度-转变	7
1.3.1 加热	7
1.3.2 冷却	12
1.3.3 珠光体的形成	14
1.3.4 贝氏体的形成	14
1.3.5 马氏体的形成	15
1.3.6 残留奥氏体	19
1.3.7 时间-温度-转变图 (TTT图)	21
1.4 回火时马氏体和残留奥氏体的分解	22
1.5 扩散	25
1.5.1 扩散的性质	25
1.5.2 影响扩散速度的因素	26
1.5.3 扩散距离的计算	27
1.6 位错	31
1.7 晶粒度	35
1.7.1 晶界	35
1.7.2 晶粒度的测定方法	37
1.7.3 晶粒度测定实例	41
2. 材料试验	46
2.1 硬度试验	46
2.1.1 布氏硬度试验	46
2.1.2 维氏硬度试验	47
2.1.3 努氏 (Knoop) 硬度试验	48

2.1.4 洛氏硬度试验	48
2.1.5 肖氏硬度试验	52
2.1.6 各种硬度标尺的换算表	53
2.2 拉力试验	56
2.2.1 按不同标准得到的各机械性能之间的对比	60
2.3 冲击试验	60
2.4 扭转冲击试验	63
2.5 疲劳试验	65
2.5.1 概述	65
2.5.2 试验方法	67
2.5.3 疲劳断口的不同类型	69
2.5.4 古德曼 (Goodman) 图	71
2.5.5 疲劳极限—极限抗拉强度	72
2.5.6 表面光洁度	73
2.5.7 截面变化的影响	76
2.5.8 提高疲劳极限的方法	77
2.6 蠕变试验	77
2.7 脆性断裂和韧性断裂	79
2.8 断裂韧性	84
2.8.1 断裂韧性的意义	88
3. 钢中的合金元素	91
3.1 固体	91
3.1.1 奥氏体形成元素	91
3.1.2 铁素体形成元素	92
3.1.3 多元合金钢	94
3.1.4 碳化物形成元素	94
3.1.5 碳化物稳定元素	95
3.1.6 氮化物形成元素	95
3.1.7 对铁素体硬度的影响	96
3.1.8 对晶粒长大的影响	96
3.1.9 对共析点的影响	97
3.1.10 对马氏体形成温度的影响	99

8.1.11 对等温转变过程中珠光体和贝氏体的形成的影响	100
8.1.12 对回火稳定性的影响	116
3.2 气体	122
3.2.1 氢	122
3.2.2 氮	126
3.2.3 氧	129
3.3 新的炼钢法	132
3.3.1 真空重熔	133
3.3.2 电渣精炼	133
3.3.3 真空除气	136
3.3.4 博福斯脱硫法	137
3.3.5 硫对钢的性能的影响	138
4. 淬透性	144
4.1 总论	144
4.2 格罗斯曼 (Grossmann) 淬透性试验	146
4.2.1 根据化学成分计算 D_1 值	148
4.3 顶端淬透性试验	154
4.3.1 根据化学成分计算顶端淬火曲线	155
4.3.2 顶端淬火曲线的实际应用	163
4.4 TTT图和CCT图的实际应用	172
4.5 淬透性的实际应用	182
4.5.1 高淬透性	182
4.5.2 低淬透性	184
4.6 硬化深度对应力分布的影响	193
5. 普通热处理	200
5.1 退火	200
5.1.1 获得最低硬度的退火或球化退火	201
5.1.2 再结晶退火	207
5.1.3 消除应力退火	208
5.1.4 等温退火	212
5.1.5 硬化退火	213
5.1.6 均匀化退火	215

5.1.7 氢退火	215
5.1.8 脱氢	215
5.2 正火	216
5.3 淬火	219
5.3.1 加热介质	219
5.3.2 加热速度	229
5.3.3 淬火温度	233
5.3.4 淬火温度下的保温时间	237
5.3.5 冷却方法	241
5.3.6 淬火介质	248
5.3.7 淬火设备	259
5.4 回火	264
5.4.1 加热温度	264
5.4.2 加热速度	265
5.4.3 保温时间	270
5.4.4 双重回火	275
5.4.5 回火脆性	276
5.5 残留奥氏体的转变	280
5.6 沉淀硬化	284
5.7 矫直	288
5.8 加工余量	289
6. 特殊热处理	293
6.1 工具钢的淬火和回火	293
6.1.1 碳钢和钎合金钢	293
6.1.2 低合金冷作模具钢	297
6.1.3 低合金冷作模具钢和热作模具钢	306
6.1.4 高合金冷作模具钢	309
6.1.5 热作模具钢	324
6.1.6 高速钢	348
6.2 结构钢的淬火和回火	355
6.2.1 定义	355
6.2.2 普通碳钢	355

6.2.3 合金钢	358
6.2.4 不锈钢	366
6.2.5 弹簧钢	370
6.2.6 高强度钢	372
6.2.7 哈特菲尔德钢	376
6.3 表面硬化	376
6.3.1 定义	376
6.3.2 钢的牌号	380
6.3.3 渗碳方法	380
6.3.4 热处理和钢的成分对渗层深度、 表面硬度和心部硬度的影响	398
6.3.5 表面硬化守则	410
6.3.6 工具钢的表面硬化	411
6.3.7 渗碳的防护(局部渗碳)	413
6.3.8 表面硬化深度的选择	415
6.4 氮化	417
6.4.1 氮化方法	421
6.4.2 气体氮化和盐浴氮化的对比	428
6.4.3 氮化能力	437
6.4.4 氮化深度的测定	447
6.4.5 各种类型的氮化钢	448
6.4.6 氮化钢的性能	462
6.5 碳氮共渗	471
6.5.1 定义	471
6.5.2 理论基础	472
6.5.3 结论	477
6.6 感应淬火	477
6.6.1 基本原理	477
6.6.2 感应淬火用钢	480
6.6.3 感应淬火设备	480
6.6.4 感应圈和夹具	481
6.6.5 感应淬火法	483

6.6.6 各种因素对硬度和硬化深度的影响	486
6.6.7 感应淬火机件的实例	494
6.6.8 感应淬火的优点和缺点	497
6.7 火焰淬火	498
6.7.1 淬火方法	498
6.7.2 硬度和硬化深度	500
6.7.3 火焰淬火机件和工具的实例	505
7. 淬火和回火时的尺寸变化	514
7.1 淬火时的尺寸变化	514
7.1.1 热应力	514
7.1.2 相变应力	514
7.2 回火时的尺寸变化	520
7.2.1 体积变化	520
7.2.2 应力状态的变化	522
7.3 工具钢淬火和回火时的尺寸变化实例	523
7.3.1 普通碳钢	523
7.3.2 低合金钢	524
7.3.3 高合金冷作模具钢	541
7.3.4 热作模具钢	544
7.3.5 高速钢	554
7.4 表面硬化时的尺寸变化	559
7.5 氮化时的尺寸变化	569
7.6 时效	574
7.7 热处理对结构设计的要求	578
8. 附录	584
8.1 与Bofors和Uddeholm (UHB)	
钢相对照的一些标准钢号	584
表 8.1 美国标准钢号	584
表 8.2 英国标准钢号	585
表 8.3 西德标准钢号	586
表 8.4 瑞典标准钢号	587
表 8.5 AFNOR代号 (法国)	589

表 8·6 ASSAB代号 (瑞典)	590
8·2 钢棒重量表	591
表 8·7 圆钢和方钢	591
表 8·8 六角钢和八角钢	592
表 8·9 扁钢, 宽10至40毫米	593
表 8·10 扁钢, 宽45至130毫米	594
表 8·11 扁钢, 宽140至350毫米	595
表 8·12 圆钢和方钢	596
表 8·13 六角钢和八角钢	597
表 8·14 扁钢, 宽 $\frac{3}{8}$ 至 $1\frac{1}{2}$ 英寸	597
表 8·15 扁钢, 宽 $1\frac{5}{8}$ 至5英寸	598
表 8·16 扁钢, 宽 $5\frac{1}{2}$ 至15英寸	599
8·3 尺寸换算表	600
表 8·17a 英寸换算成毫米	600
表 8·17b 英寸换算成毫米	601
表 8·18 英寸(小数)换算成毫米	602
8·4 重量 (质量) 换算表	603
表 8·19 磅换算成公斤	603
表 8·20 英制单位换算成公斤	604
8·5 应力 (压力) 换算表	605
表 8·21 吨/英寸 ² 换算成公斤/毫米 ²	605
表 8·22 吨/英寸 ² 换算成牛顿/毫米 ²	606
表 8·23 公斤/毫米 ² 换算成牛顿/毫米 ²	607
表 8·24 磅/英寸 ² 换算成公斤/毫米 ²	609
8·6 能量换算表	610
表 8·25 公斤·米换算成英尺·磅	610
表 8·26 英尺·磅换算成公斤·米	611
表 8·27 公斤·米换算成焦耳	612
表 8·28 英尺·磅换算成焦耳	614

8.7 断裂韧性单位换算表	615
表 8.29 断裂韧性单位	615
8.8 一些常用单位的换算	615
表 8.30 常用的标准国际制单位换算成英制单位	615
表 8.31 常用的非国际制单位换算成英制单位	616
表 8.32 非国际制单位换算成国际制单位	616

1. 金相学的基本概念

金相学揭示金属的组织，使得人们可以更好地理解钢的组织 and 性能之间的相互关系。在象电子显微镜和扫描电子显微镜这样一些现代仪器的帮助下，现在对钢的组织了解要比大约十年前深入得多了。

为了理解钢在热处理时所发生的过程，有必要掌握有关钢中相平衡和相变以及钢的显微组织的一些知识。因此，本章将对这些课题作一扼要的说明，为以后各章的讨论奠定基础。

1.1 铁的相变和晶体结构

一块纯铁从室温加热到它的熔点时将发生一系列晶型转变，并呈现出两种不同的同素异构体。铁从一种晶型转变为另一种晶型要吸收热量。这种热量叫做相变潜热。假如试样以稳定的速度加热，则在转变开始时温度的升高将被中断，而且在转变结束以前温度始终保持不变。当熔化的铁向室温冷却时，转变将按相反的顺序进行，而且转变温度与加热时大致相同。在这些转变过程中有热量放出，结果使冷却速度受到抑制，只要转变在进行，这种抑制作用就继续存在。

铁的两个同素异构体叫做铁素体和奥氏体，它们稳定存在的温度范围以及加热和冷却时的转变温度示于图 1.1。字母 A 取自法文 Arrêter，是滞后的意思；字母 c 取自法文 chauffer，是加热的意思；字母 r 取自法文 refroidir，是冷却的意思。铁素体在 911°C 以下和 1392°C 到其熔点之间是稳定的，分别称之为 α -铁和 δ -铁。奥氏体用 γ -铁表示，在 911°C 至 1392°C 之间是稳定的。铁在室温时是铁磁性的；随着温度的升高，铁的磁性减弱，在 769°C （居里点）时铁的磁性完全消失。

金属中的原子排列成规则的三维形式，叫做晶体结构。以铁

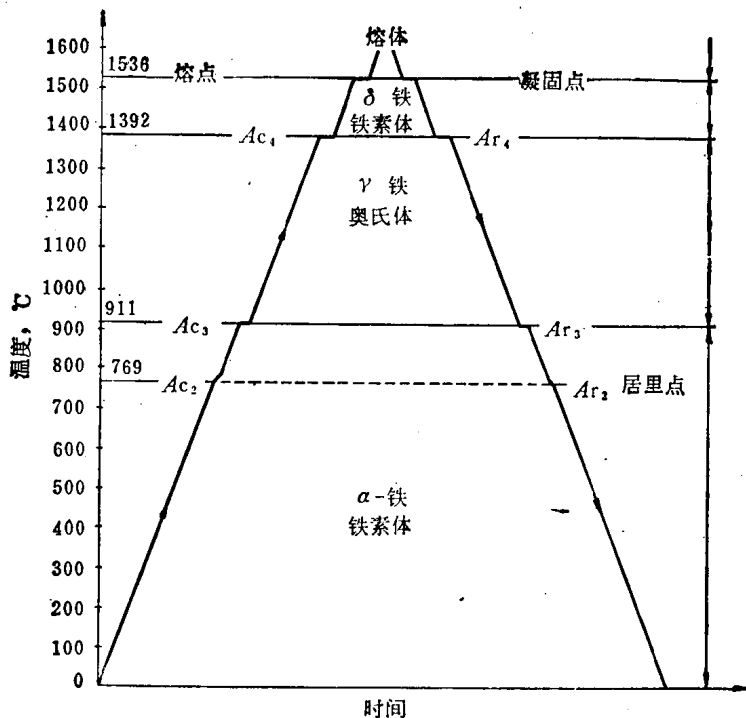


图 1.1 纯铁的加热和冷却曲线

为例，晶体结构可以描绘成是由许多立方体一个挨一个、一个摞一个地堆砌而成的。立方体的每一个角上有一个原子，而每个角上的原子为八个立方体或晶胞所共有。除了每个角上有一个原子外，铁的晶胞中还包含一些额外的原子，这些额外的原子的数目和位置随所讨论的晶型而定。

铁素体除了在晶胞的每个角上有一个原子外，还有一个原子在立方体对角线的交点上，即体心立方晶胞（BCC）。单位立方体的边长，即晶格常数，在 20°C 时为 2.87 Å（Å = 10⁻⁸ 厘米）。奥氏体具有面心立方晶格（FCC），晶格常数为 3.57 Å（外推至 20°C）。α-铁晶胞和 γ-铁晶胞的结构可分别设想成如图 1.2 所示。γ-铁晶胞的晶格常数比 α-铁晶胞的大，但 γ-铁晶胞含有更多

的原子，因而具有较大的密度； γ -铁在20°C时的密度为8.14克/厘米³，而 α -铁为7.87克/厘米³。

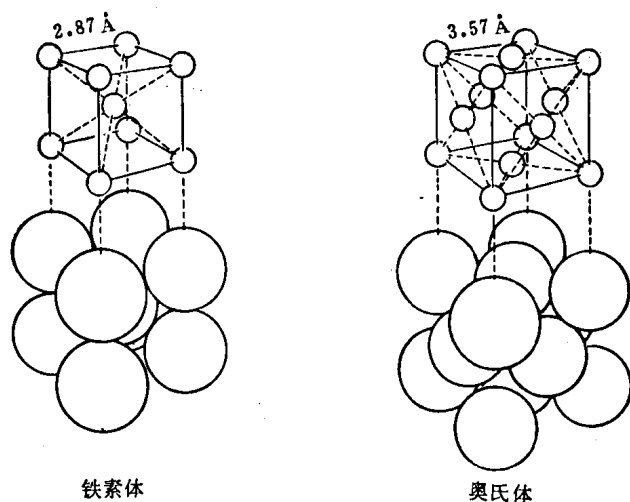


图 1·2 铁素体和奥氏体的晶体结构

1·2 铁-碳平衡图

碳是钢中最重要的合金元素。碳的存在在很大程度上是使钢能够获得各种广泛性能的原因，从而使这种金属成为极其有用的日用品。室温时，碳在 α -铁中的溶解度是很小的，因此只能偶而在铁原子之间找到碳原子。大部分的碳结合在碳化铁中，又叫做渗碳体 Fe_3C 。碳化铁可以层片状存在，并与铁素体层片相间排列，共同构成一种叫做珠光体的组织，珠光体的平均含碳量是0.80%。珠光体在组织中的比例随钢中含碳量的增加而不断增多，直到含碳0.80%。超过这一含量的碳便以晶界碳化物的形式析出。含碳0.80%的钢叫做共析钢（见图1·3a~d）。

当铁用碳合金化时，转变将在一个温度范围内进行，这个温度范围与含碳量有关，如铁-碳平衡相图所示。图1·4示出适用于钢的热处理的那部分铁-碳平衡图及其对应的各种显微组织。为

了完整起见，在图1·5中把相图作到含碳6%；从图上可以看到，碳在奥氏体中的溶解度要比铁素体中的大得多。

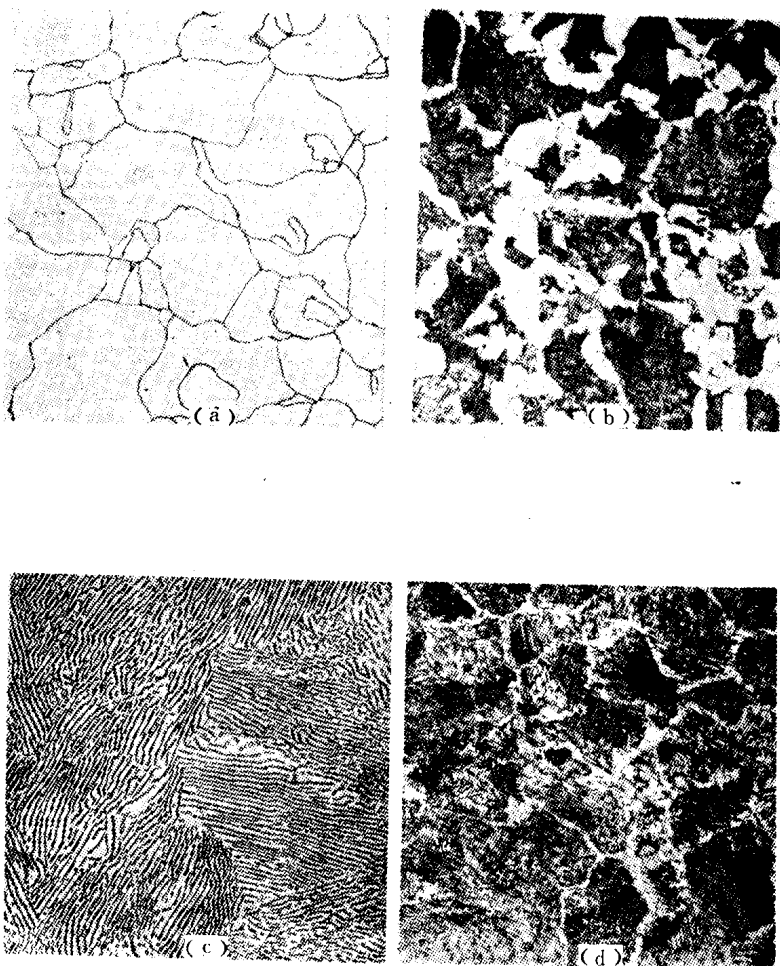


图 1·3 不同含碳量的碳钢的显微组织：(a) 铁素体，0.0% C。500×；(b) 铁素体+珠光体，0.40% C。500×；(c) 珠光体，0.80% C。1000×；(d) 珠光体+晶界渗碳体，1.4% C。500×

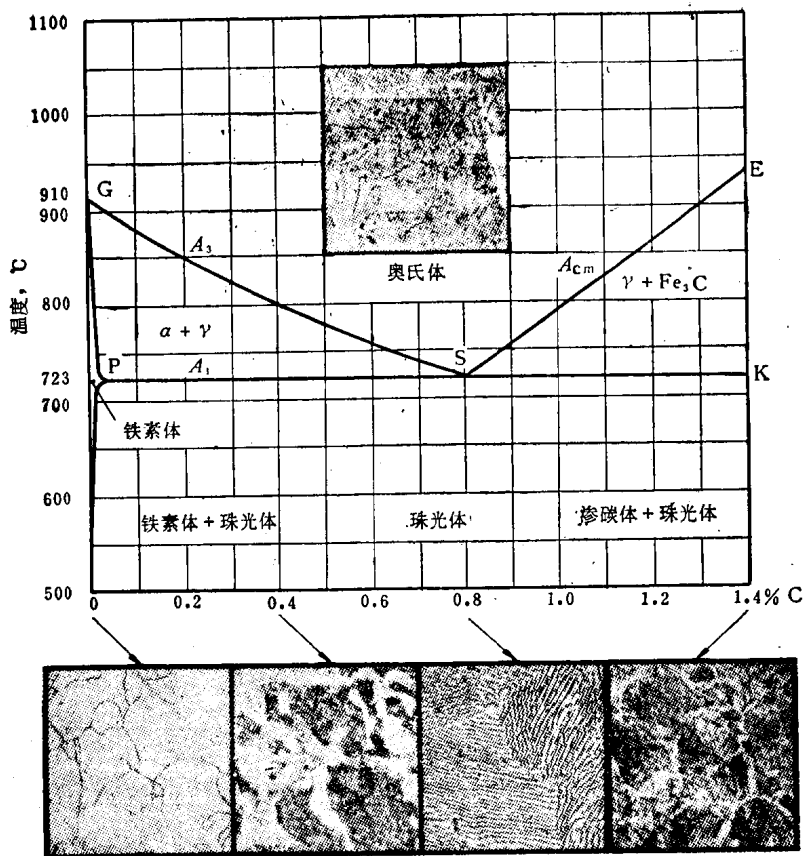


图 1·4 铁-碳平衡图的左下部分

1·2·1 加热

上面已经提到，加热至911°C， α -铁便转变成 γ -铁。这从图1·4上左侧垂直轴上可以看到。在含碳0.80%的钢中，即在共析钢中，大约在723°C时发生向奥氏体的转变。 α -铁、 γ -铁和渗碳体处于平衡的温度，用 A_1 表示（图中PK线）。含碳低于0.80%的钢叫做亚共析钢，在同样的温度即723°C，珠光体开始转变为奥氏体。在PS和GS之间的平衡区内，有由珠光体形成的奥氏体和

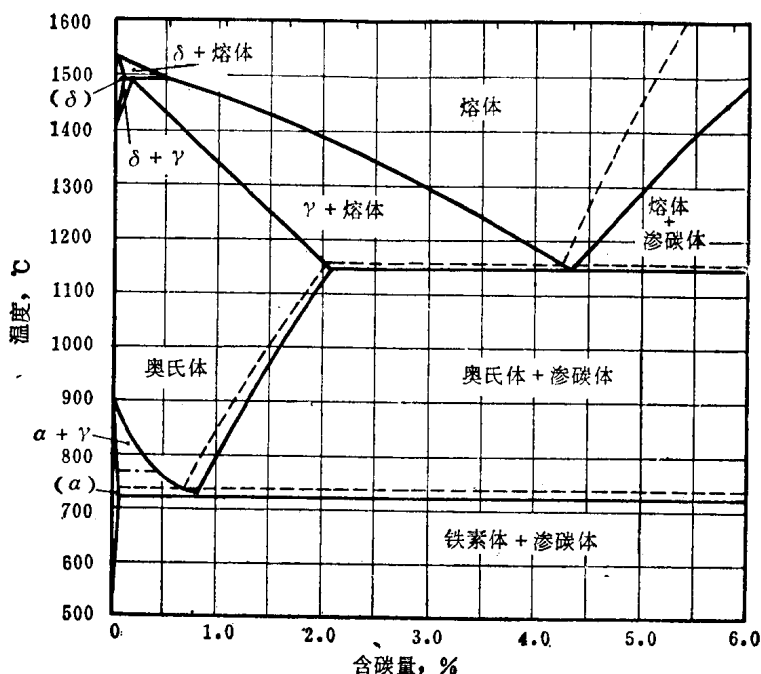


图 1.5 铁-碳平衡图

——Fe-C稳定系；——Fe-Fe₃C介稳系

未发生转变的铁素体。一直到由GS线所表示的温度 A_3 ，转变才

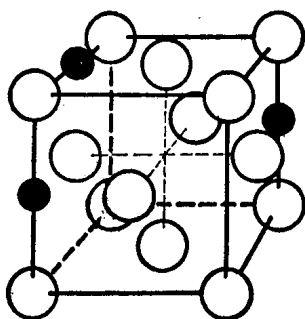


图 1.6 碳原子在 γ -铁中的位置
(例)

完成。在GS线以上，只有一个稳定相，即奥氏体。如果碳的含量超过0.80%，这种钢就叫做过共析钢。在过共析钢中珠光体同样在723°C转变为奥氏体，而渗碳体（碳化铁）只有当温度升至平衡线SE（用 A_{cm} 表示）以上时才完全溶入固溶体。

现在让我们回到加热时所发生的过程。我们发现，含碳超过

0.025%的钢在723°C时便开始发生向奥氏体的转变。这就是说，

原子排列从铁素体变成溶解碳原子更多的奥氏体。碳原子在奥氏体中的位置如图1.6所示。温度超过G-S-E，只有单一的奥氏体，所有的碳都被溶解，并且均匀地分布在整個奥氏体中。

1.2.2 冷却

当共析碳钢从完全奥氏体化的温度缓慢地降到723°C以下时，开始发生 γ -铁向 α -铁的转变，结果迫使碳脱离晶格而形成渗碳体。当完全冷至室温，钢重新具有珠光体组织。

1.3 时间-温度-转变

毫无疑问，铁-碳平衡图对热处理操作是十分重要的。但平衡图只描述在铁、碳两组元间建立平衡时的情况。在绝大多数热处理工作中，时间参数是一个决定性因素，时间的影响由所谓的时间-温度-转变图表示。从这些图上可以看到时间和温度二个因素对转变进程的影响。

1.3.1 加热

时间的影响最好用图1.7 a ~ f 的示意图来说明。图1.7 a 是我们熟悉的铁-碳平衡图，从图上可以看到，含0.80% C 的钢加热时在723°C转变成奥氏体。可是，图上没有告诉我们这种转变需要多长时间。从图1.7 b 可以判断，当温度保持在730°C时转变约经30秒后开始；此图仅适用于0.80%碳钢，图上时间用对数坐标表示。如果将钢迅速加热至750°C，转变经过10秒后开始；如果加热到810°C，转变在稍许超过1秒便开始，也就是说实际上在达到该温度时转变立即发生。珠光体向奥氏体和渗碳体的转变在810°C时大约经过6秒完成。如果要使钢达到完全奥氏体化，必须在此温度保持大约5小时。在实际操作中，也就是在淬火加热时，很少使渗碳体得到完全溶解。

图1.7 c 和 d 适用于0.45% C 的普通碳钢，从图上同样可以看到，例如加热到810°C时几乎立即发生从珠光体到奥氏体的转变。5秒后完成珠光体转变，此时的组织由铁素体、奥氏体和渗碳体组成。经过大约1分钟，碳扩散到铁素体中，使铁素体转变