



## 第十章 钢的热处理工艺

### 10-1 何谓钢的退火？退火种类及用途如何？

答：

**钢的退火：**退火是将钢加热至临界点  $AC_1$  以上或以下温度，保温一定时间以后随炉缓慢冷却以获得近于平衡状态组织的热处理工艺。

**退火种类：**根据加热温度可以分为在临界温度  $AC_1$  以上或以下的退火，前者包括完全退火、不完全退火、球化退火、均匀化退火，后者包括再结晶退火、去应力退火，根据冷却方式可以分为等温退火和连续冷却退火。

**退火用途：**

- 1、完全退火：完全退火是将钢加热至  $AC_3$  以上  $20-30^\circ\text{C}$ ，保温足够长时间，使组织完全奥氏体化后随炉缓慢冷却以获得近于平衡状态组织的热处理工艺。其主要应用于亚共析钢，其目的是细化晶粒、消除内应力和加工硬化、提高塑韧性、均匀钢的化学成分和组织、改善钢的切削加工性能，消除中碳结构钢中的魏氏组织、带状组织等缺陷。
- 2、不完全退火：不完全退火是将钢加热至  $AC_1-AC_3$ （亚共析钢）或  $AC_1-AC_{cm}$ （过共析钢）之间，保温一定时间以后随炉缓慢冷却以获得近于平衡状态组织的热处理工艺。对于亚共析钢，如果钢的原始组织分布合适，则可采用不完全退火代替完全退火达到消除内应力、降低硬度的目的。对于过共析钢，不完全退火主要是为了获得球状珠光体组织，以消除内应力、降低硬度，改善切削加工性能。
- 3、球化退火：球化退火是使钢中碳化物球化，获得粒状珠光体的热处理工艺。主要用于共析钢、过共析钢和合金工具钢。其目的是降低硬度、改善切削加工性能，均匀组织、为淬火做组织准备。
- 4、均匀化退火：又称扩散退火，它是将钢锭、铸件或锻轧坯加热至略低于固相线的温度下长时间保温，然后缓慢冷却至室温的热处理工艺。其目的是消除铸锭或铸件在凝固过程中产生的枝晶偏析及区域偏析，使成分和组织均匀化。
- 5、再结晶退火：将冷变形后的金属加热到再结晶温度以上保持适当时间，然后缓慢冷却至室温的热处理工艺。其目的是使变形晶粒重新转变为均匀等轴晶粒，同时消除加工硬化和残留内应力，使钢的组织 and 性能恢复到冷变形前的状态。
- 6、去应力退火：在冷变形金属加热到再结晶温度以下某一温度，保温一段时间然后缓慢冷却至室温的热处理工艺。其主要目的是消除铸件、锻轧件、焊接件及机械加工工件中的残留内应力（主要是第一类内应力），以提高尺寸稳定性，减小工件变形和开裂的倾向。

### 10-2 何谓钢的正火？目的如何？有何应用？

答：

**钢的正火：**正火是将钢加热到  $AC_3$  或  $Accm$  以上适当温度，保温适当时间进行完全奥氏体化以后，以较快速度（空冷、风冷或喷雾）冷却，得到珠光体类组织的热处理工艺。正火过程的实质是完全奥氏体化加伪共析转变。

**目的：**细化晶粒、均匀成分和组织、消除内应力、调整硬度、消除魏氏组织、带状组织、网状碳化物等缺陷，为最终热处理提供合适的组织状态。

**应用：**

- 1、改善低碳钢的切削加工性能。
- 2、消除中碳钢的热加工缺陷（魏氏组织、带状组织、粗大晶粒）。
- 3、消除过共析钢的网状碳化物，便于球化退火，为淬火做好组织准备。
- 4、作为最终热处理，提高普通构件的力学性能。

**10-3 在生产中为了提高亚共析钢的强度，常用的方法是提高亚共析钢中珠光体的含量，问应该采用什么热处理工艺？**

**答：**

应该采用正火工艺。

**原因：**亚共析钢过冷奥氏体在冷却过程中会析出先共析铁素体，冷却速度越慢，先共析铁素体的含量越多，从而导致珠光体的含量变少，降低亚共析钢的硬度和强度。而正火工艺的实质就是完全奥氏体化加上伪共析转变，可以通过增大冷却速度降低先共析铁素体的含量，使亚共析成分的钢转变成共析组织，即增加了珠光体的含量，从而可以提高亚共析钢的强度和硬度。

**10-4 淬火的目的是什么？淬火方法有几种？比较几种淬火方法的优缺点？**

**答：**

**淬火的目的是：**获得尽量多的马氏体，可以显著提高钢的强度、硬度、耐磨性，与各种回火工艺相配合可以使钢在具有高强度高硬度的同时具有良好的塑韧性

将钢加热至临界点  $AC_3$  或  $AC_1$  以上一定温度，保温适当时间后以大于临界冷却速度的冷速冷却得到马氏体（或下贝氏体）的热处理工艺叫做淬火。

**淬火方法：**按冷却方式可以分为：单液淬火法、双液淬火法、分级淬火法、等温淬火法

**优缺点比较：**

| 淬火方法  | 优点   | 缺点   |
|-------|--|--|
| 单液淬火法 | 操作简单、应用广泛  | 1、只适用于小尺寸且形状简单的工件<br>2、淬火应力大<br>3、不容易选择冷却能力和冷却特性较合适的冷却介质 |
| 双液淬火法 | 1、降低组织应力，减小工件变形、开裂的倾向<br>2、适用于尺寸较大的工件              | 操作不容易控制，需要丰富的经验和熟练的技术                                    |
| 分级淬火法 | 1、降低热应力和组织应力，减小工件变形、开裂的倾向<br>2、操作相对容易控制            | 只适用于尺寸较小的工件  |
| 等温淬火法 | 1、降低热应力和组织应力，显著减小工件变形、开裂倾向<br>2、适宜处理形状复杂、尺寸要求精密的工件 | 只适用于尺寸较小的工件  |

**10-5 试述亚共析钢和过共析钢淬火加热温度的选择原则。为什么过共析钢淬火加热温度不能超过  $Accm$  线？**



答：

**淬火加热温度选择原则：**以得到均匀细小的奥氏体晶粒为原则，以便获得细小的马氏体组织。亚共析钢通常加热至  $AC_3$  以上  $30-50^\circ C$ ，过共析钢加热至  $AC_1$  以上  $30-50^\circ C$ 。

1、过共析钢的淬火加热温度超过  $A_{ccm}$  线，碳化物全部溶入奥氏体中，使奥氏体的含碳量增加，降低钢的  $M_s$  和  $M_f$  点，淬火后残留奥氏体量增多，会降低钢的硬度和耐磨性

2、过共析钢淬火温度过高，奥氏体晶粒粗化、含碳量又高，淬火后易得到有显微裂纹的粗针状马氏体，降低钢的塑韧性

3、高温淬火时淬火热应力大，氧化脱碳严重，也增大钢件变形和开裂的倾向。

#### 10-6 何谓钢的淬透性、淬硬性？影响钢的淬透性、淬硬性及淬透层深度的因素？

答：

**淬透性：**钢的淬透性是指奥氏体化后的钢在淬火时获得马氏体的能力，它反映过冷奥氏体的稳定性，与钢的临界冷却速度有关。其大小以钢在一定条件下淬火获得的淬透层深度和硬度分布来表示。

**淬硬性：**钢的淬硬性是指奥氏体化后的钢在淬火时硬化的能力，主要取决于马氏体中的含碳量，用淬火马氏体可能达到的最高硬度来表示。

**淬透层深度：**淬透层深度是指钢在具体条件下淬火时测定的半马氏体区至工件表面的深度。它与钢的淬透性、工件形状尺寸、淬火介质的冷却能力有关。

#### 10-7 有一圆柱形工件，直径 35mm，要求油淬后心部硬度大于 45HRC，能否采用 40Cr 钢？

答：解答此题需用到 40Cr 的淬透性曲线图（端淬曲线图）

根据手册可以查到 40Cr 端淬曲线图，直径 35mm 圆柱工件在油淬后的心部硬度范围为 34-50HRC（钢的淬透性受化学成分、晶粒度、冶炼情况等元素影响，一条淬透性曲线实际上是一条淬透性带），也就是说心部硬度有可能大于 45HRC，也有可能小于 45HRC，所以不建议使用 40Cr 钢。

#### 10-8 有一 40Cr 钢圆柱形工件，直径 50mm，求油淬后其横截面的硬度分布？

答：解答此题需用到 40Cr 的淬透性曲线图（端淬曲线图）

根据手册可以查到 40Cr 端淬曲线图，查图可得：

油淬后中心硬度范围：28-43.5HRC

油淬后距中心  $3/4R$  硬度范围：33.5-50 HRC

油淬后表面硬度范围：45-57HRC

#### 10-9 何谓调质处理？回火索氏体比正火索氏体的力学性能为何较优越？

答：

**调质处理：**习惯上将淬火加高温回火称为调质处理，其目的是为了获得既有较高的强度、硬度，又有良好的塑性及冲击韧性的综合力学性能。

**性能比较：**

在相同硬度条件下，回火索氏体和正火索氏体抗拉强度相近，但回火索氏体的屈服强度、塑性、韧性等性能都优于正火索氏体。

这是因为，回火索氏体是由淬火马氏体分解而得到，其组织为铁素体加颗粒状碳化物。而正火索氏体是由过冷奥氏体直接分解而来，其组织为铁素体加片状碳化物。





正火索氏体受力时，位错的运动被限制在铁素体内，当位错运动至片状碳化物界面时形成很大的平面位错塞积群，使基体产生很大的应力集中，易使碳化物脆断或形成微裂纹。而粒状碳化物对铁素体的变形阻碍作用大大减弱，塑性和韧性得到提高，当粒状碳化物均匀地分布在塑性基体上是，由于位错和第二相粒子的交互作用产生弥散强化或沉淀强化，提高钢的塑性变形抗力，从而提高强度。

因此相比较正火索氏体，回火索氏体具有更好的强度、塑性、韧性等性能。

#### 10-10 为了减少淬火冷却过程中的变形和开裂，应当采取什么措施？

答：

**变形和开裂原因：**由于冷却过程中工件内外温度的不均匀性以及相变的不同时性造成工件中产生的内应力，淬火内应力分为热应力和组织应力两种。当淬火应力超过材料的屈服强度时，就会产生塑性变形，当淬火应力超过材料的断裂强度时，工件则发生开裂。

**应采取的措施（工艺角度）：**

- 1、控制淬火加热温度不宜过高：加热温度高，奥氏体晶粒粗化，淬火后得到粗大的马氏体，应力和脆性均显著增大。而且高温加热，氧化脱碳严重，也增大钢件变形和开裂倾向。
- 2、选择适当的冷却方法：降低马氏体转变时的冷却速度，可以降低马氏体的转变速度，减少淬火应力，降低工件变形和开裂的倾向。
- 3、选择合适的淬火冷却介质：具有理想冷却特性（珠光体转变点以上冷速较慢，快速通过C曲线鼻尖，在Ms点以下缓慢冷却）的冷却介质可以在获得马氏体组织前提下减少淬火应力，降低工件变形和开裂的倾向。

#### 10-11 现有一批 45 钢普通车床传动齿轮，其工艺路线为锻造-热处理-机械加工-高频感应加热淬火-回火。试问锻后应进行何种热处理？为什么？

答：

**锻后热处理：**完全退火或不完全退火

**原因：**中碳结构钢铸件、锻轧件中，可能存在魏氏组织、带状组织、晶粒粗大等缺陷，粗大的魏氏组织显著降低钢的塑性和韧性，带状组织使钢的性能具有方向性。完全退火可以细化晶粒，消除内应力，消除魏氏组织和带状组织缺陷。如果其锻造工艺正常，原始组织分布合适，只是珠光体片间距小、硬度偏高、内应力较大，则可以用不完全退火代替完全退火。

#### 10-12 有一直径 10mm 的 20 钢制工件，经渗碳热处理后空冷，随后进行正常的淬火、回火处理，试分析渗碳空冷后及淬火、回火后，由表面到心部的组织。

答：

**表层组织：**高碳细针状回火马氏体及少量残余奥氏体

**心部组织：**先共析铁素体和珠光体

#### 10-13 设有一种 490 柴油机连杆，直径 12mm，长 77mm，材料为 40Cr，调质处理。要求淬火后心部硬度大于 45HRC，调质处理后心部硬度为 22-33HRC。试制定热处理工艺。

**答：**解答此题需要 40Cr 临界相变点 AC3 和淬透性曲线（通过查手册：AC3=782℃）  
**热处理工艺：**



奥氏体化温度= $AC_3 + (30-50^\circ C)$ ，取  $820^\circ C$

保温时间= $KD=15min$ ， $K=1.5mm/min$

根据 40Cr 的淬透性曲线可以得出，直径 12mm 的 40Cr 钢油淬后的心部硬度最低为 47 HRC。

查手册可以发现 40Cr 在  $650^\circ C$  回火，其硬度为 25-30HRC，符合心部硬度要求。回火时间= $KD=24min$ ， $K=2mm/min$ ，为防止产生回火脆性回火后冷却可采用空冷或水冷。热处理工艺为：将连杆加热至  $820^\circ C$  保温 15min，油淬至室温，再加热至  $650^\circ C$  保温 24min，空冷至室温。

**10-14 写出 20Cr2Ni4A 钢重载渗碳齿轮的冷、热加工工序安排，并说明热处理所起的作用。**

答：

**冷、热加工工序安排：**冶炼-铸造-扩散退火-锻造-完全退火-粗加工-渗碳-(淬火+回火)-精加工

**热处理所起作用：**

扩散退火：消除凝固过程的枝晶偏析和区域偏析，均匀化学成分和组织。

完全退火：细化晶粒、均匀钢的化学成分和组织、消除内应力和加工硬化、消除魏氏组织和带状组织等缺陷、改善钢的切削加工性能。

渗碳：使活性碳原子渗入齿轮表面，获得一定深度高碳渗层（一般碳含量：0.85-1.05%，渗层深度：0.5-2mm）

淬火-回火：使齿轮表面获得高碳细针状回火马氏体组织+少量残留奥氏体，具有高硬度、良好的耐磨性以及接触疲劳强度；使心部获得低碳板条回火马氏体+少量铁素体组织，具有较高的强度和良好的塑韧性。

**10-15 指出直径 10mm 的 45 钢（退火状态），经下列温度加热并水冷所获得的组织：  
 $700^\circ C$ 、 $760^\circ C$ 、 $840^\circ C$ 。**

答：解答此题需找到 45 钢的临界相变点  $AC_1$  和  $AC_3$ （可查手册得知： $AC_1=724^\circ C$ ， $AC_3=780^\circ C$ ）

**$700^\circ C$ ：**将 45 钢加热至  $700^\circ C$  未发生珠光体组织向奥氏体转变，因此水冷时无奥氏体向马氏体转变，所以水冷后的组织仍为退火状态的组织：珠光体+块状铁素体

**$760^\circ C$ ：** $760^\circ C$  介于  $AC_1$  和  $AC_3$  之间，在此温度加热保温，珠光体组织转变为奥氏体，但保留一部分先共析铁素体和未熔的渗碳体颗粒，水冷时发生奥氏体向马氏体的转变，所以水冷后的组织为：马氏体+块状铁素体+粒状碳化物

**$840^\circ C$ ：**在此温度下保温，铁素体+珠光体组织将全部转变为奥氏体，水冷后的组织为马氏体+残留奥氏体

**10-16 T10 钢经过何种热处理能获得下述组织：**

- 1) 粗片状珠光体+少量球状渗碳体
- 2) 细片状珠光体
- 3) 细球状珠光体
- 4) 粗球状珠光体

答：

**热处理工艺（待论证）：**

- 1) 粗片状珠光体+少量球状渗碳体：亚温加热+等温退火



- 2) 细片状珠光体: 正火处理
- 3) 细球状珠光体: 淬火+中温回火或循环球化退火工艺
- 4) 粗球状珠光体: 淬火+高温回火或球化退火工艺

**10-17** 一零件的金相组织是: 在黑色的马氏体基体上分布有少量的珠光体组织, 问此零件原来是如何热处理的?

答:

热处理工艺 (待论证):

淬火+低温回火, 淬火得到马氏体基体+残留奥氏体, 经低温回火后马氏体变成黑色针状回火马氏体, 残留奥氏体转变为珠光体。

