

Ch 5 钢的热处理

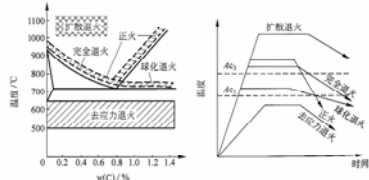
- 在实际的生产中有时需要软化钢铁材料便于切削加工，根据组织与性能的关系可以知道这时应采用珠光体组织。又根据转变的动力学规律可以知道，奥氏体化后应采用较慢的冷速进行冷却。这就出现了退火(annealing)或正火(normalizing)工艺。
- 生产中有时又需要硬化钢铁材料因此要采用马氏体组织且应用较快的速度冷却，因此出现了淬火(quenching)与回火(tempering)工艺。
- 本章要掌握这些工艺的处理过程、目的与制定原则。
- 按照应用特点，常用热处理工艺大致可分为：
 - (1) 普通(常规)热处理：退火、正火、淬火和回火；
 - (2) 表面热处理和化学热处理：如感应淬火、火焰加热淬火、电接触加热淬火、激光表面处理；渗碳、氮化、碳氮共渗、渗硼（硼、铝、硅、铬）；
 - (3) 其他热处理：气氛热处理，真空热处理、形变热处理等。

§ 5-1 常规热处理工艺

一、退火

定义：将组织偏离平衡状态的钢加热到适当温度，保温一定时间，然后缓慢冷却（一般为随炉冷却），以获得接近平衡状态组织的热处理工艺叫做退火。

- 根据处理的目的和要求不同，钢的退火分为完全退火、等温退火、球化退火、扩散退火和去应力退火。



碳钢各种退火和正火工艺规范示意图
(a)加热温度范围 (b)工艺曲线

(1)、完全退火

- 完全退火又称重结晶退火，是把钢加热到Ac3温度以上20~30℃保温一定时间后，缓慢冷却，以获得接近平衡组织的热处理工艺。
- 完全退火的目的在于，通过完全重结晶，使热加工造成的粗大组织、不均匀组织均匀化和细化，以提高性能；或使中碳以上的碳钢或合金钢得到接近平衡的组织，以降低硬度，改善切削加工性能。
- 完全退火主要用于亚共析钢，处理后的组织为F+P。过共析钢不宜采用（形成连续的晶界网状二次渗碳体组织，降低韧性，并可能引起开裂）。
- 表 45#钢锻造后和完全退火后的机械性能比较

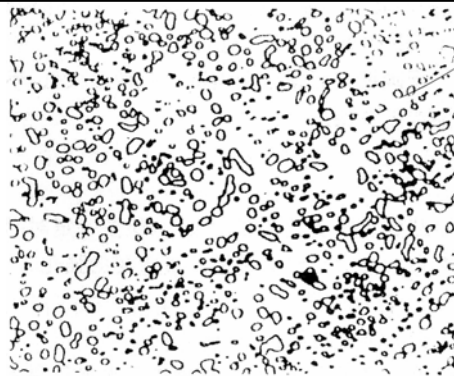
状态	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	ψ /%	a_K /KJ·m ⁻²	硬度HB/kgf·mm ⁻²
锻造后	650~700	300~400	5~15	20~40	200~400	≤229
完全退火后	600~700	300~350	15~20	40~50	400~600	≤207

(2)、等温退火

- 等温退火是将钢加热到高于Ac3或Ac1的温度，保温适当时间后，较快冷却到珠光体区的某一温度保温，使奥氏体转变为珠光体组织，然后缓慢冷却的热处理工艺。
- 等温退火的目的与完全退火相同。但组织较易控制，对于奥氏体比较稳定的合金钢，可大大缩短退火时间。

(3)、球化退火

- 球化退火适用于过共析钢，其目的是使钢中的二次渗碳体和珠光体中的渗碳体球化（退火前先正火将网状渗碳体破碎），以降低硬度，改善切削加工性能，并为以后的淬火作组织准备。
- 球化退火可以采用一次球化，也可采取反复球化工艺。
- 球化退火后的组织为等轴状铁素体上分布着细小均匀的球状碳化物。



球化退火组织

(4)、扩散退火

- 为减少钢锭、铸件或锻件的化学成分和组织不均匀性，将其加热到略低于固相线的温度，长时间保温并进行缓慢冷却的热处理工艺，称为扩散退火或均匀化退火。
- 扩散退火后钢的晶粒很粗大，因此一般再进行完全退火或正火处理。(应用：枝晶偏析的消除)

(5)、去应力退火

- 为消除铸造、锻造、焊接和机加工、冷变形等冷热加工在工件中造成的残留内应力而进行的低温退火，称为去应力退火。去应力退火的加热温度低于 A_{c1} 温度，处理前后没有组织变化，只有内应力的消除。

2、正火

- 钢材或钢件加热到 A_{c3} （对于亚共析钢）和 A_{cm} （对于过共析钢）以上 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，保温适当时间后，在自由流动的空气中均匀冷却的热处理称为正火。正火后的组织，亚共析钢为 $F+S$ ，共析钢 S ，过共析钢 $S+Fe_3C_{II}$ 。
 - 正火与完全退火的主要差别在于冷却速度快些，目的是使钢的组织正常化，所以亦称**常化处理**。
- 一般应用于以下几个方面：
- (1) 作为最终热处理
 - (2) 作为预先热处理
 - (3) 改善切削加工性能

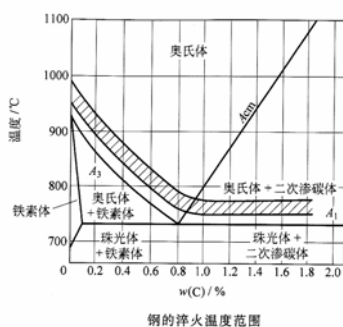
3、淬火

- 将钢加热到相变以上，保温一定时间，然后快速冷却以获得马氏体组织的热处理工艺称为淬火。淬火是钢的最重要的强化方法。

(1) 淬火工艺

(a) 淬火温度的选定

- 在一般情况下，亚共析钢的淬火加热温度为 A_{c3} 以上 $30^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ ；共析钢和过共析钢的淬火温度为 A_{c1} 以上 $30^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。



(b) 加热时间的确定

- 加热时间包括升温 and 保温两个阶段的时间。保温阶段是指钢件烧透并完成奥氏体化所需的时间。

(c) 淬火冷却介质

- 常用的冷却介质是水和油。
- 水在 $650\sim 550^{\circ}\text{C}$ 范围内冷却能力较大，在 $300\sim 200^{\circ}\text{C}$ 范围内也较大，因此易造成零件的变形和开裂，这是它的最大缺点。提高水温能够降低 $650\sim 550^{\circ}\text{C}$ 范围的冷却能力，但对 $300\sim 200^{\circ}\text{C}$ 的冷却能力几乎没有影响，而且不利于淬硬，也不能避免变形和开裂。水在生产上主要用于形状简单、截面积较大的碳钢零件的淬火。
- 油的优点是在 $300\sim 200^{\circ}\text{C}$ 范围内冷却能力低，有利于减少工件的变形；缺点是在 $650\sim 550^{\circ}\text{C}$ 范围冷却能力也低，不利于钢的淬硬，所以油一般用作合金钢的淬火介质。

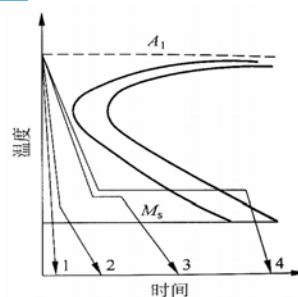
另外，为了减少零件淬火时的变形，可用盐浴作淬火介质。冷却能力介于水和油之间，适合于分级淬火和等温淬火。常用于形状复杂、变形要求严格的零件。

热处理常用盐浴的成分、熔点及使用温度见下表。

熔盐	成分	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	使用温度/ $^{\circ}\text{C}$
碱浴	80%KOH+20%NaOH +6% H_2O (外加)	130	140~250
硝盐	55% KNO_3 +45% NaNO_2	137	150~500
硝盐	55% KNO_3 +45% NaNO_3	218	230~550
中性盐	30%KCl+20%NaCl +50% BaCl_2	560	580~800

(d) 淬火方法

- 常用的淬火方法有单介质淬火、双介质淬火、分级淬火和等温淬火等，如右图所示。



不同淬火方法示意图
1—单介质淬火；2—双介质淬火；
3—分级淬火；4—等温淬火

(2) 钢的淬透性

- 略

4、回火

- 定义：钢件淬火后，为了消除内应力并获得所要求的组织和性能，将其加热到 A_{c1} 以下某一温度保温一定时间，然后冷却到室温的热处理工艺叫做回火。
- 淬火钢件一般不能直接使用，必须进行回火。
- 这是因为：
 - 第一，淬火得到的是性能很脆的马氏体组织，并存在有内应力，容易产生变形和开裂；
 - 第二，淬火马氏体和残余奥氏体都是不稳定组织，在使用中会发生分解，导致零件尺寸的变化，这对精密零件是不允许的；
 - 第三，为了获得一定的强度、硬度、塑性和韧性，以满足零件的使用要求。根据回火的温度高低，一般分为低温回火、中温回火和高温回火。

(1) 低温回火

回火温度为 $150\sim 250^{\circ}\text{C}$ ，组织为 $M_{\text{回}}+(A')$ ，高碳回火马氏体为黑色针状，低碳回火马氏体为暗板条状，中碳介于两者之间。

低温回火的目的是降低淬火应力，提高工件韧性，保证淬火后的高硬度（一般为HRC58~64）。主要用于处理各种高碳工具钢、模具钢、滚动轴承以及渗碳和表面淬火零件。

(2) 中温回火

回火温度为 $350\sim 500^{\circ}\text{C}$ ，组织为 $T_{\text{回}}$ ，其中铁素体仍保持马氏体的形态，碳化物为细小弥散渗碳体，比回火马氏体中的碳化物粗大。

回火屈氏体具有高的弹性极限和屈服强度，同时也具有一定的韧性，硬度一般为HRC35~45。主要用于处理各种弹簧钢（中高碳钢，如60Si2Mn）。

(3) 高温回火

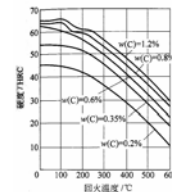
回火温度为 $500\sim 650^{\circ}\text{C}$ ，组织为 $S_{\text{回}}$ ，碳化物为粒状渗碳体，铁素体为经过再结晶的等轴状铁素体。

回火索氏体综合机械性能最好，即强度、塑性、韧性都比较好，硬度一般为HRC25~35。通常把淬火加高温回火称为调质处理，各种重要的机器结构件，特别是受交变载荷的零件，如连杆、轴、齿轮等广泛采用调质处理工艺，也可作为某些精密工件如量具、模具等的预先热处理，特别适合于中碳钢，如45#。

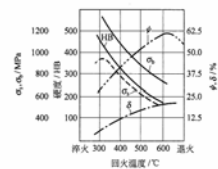
- 钢调质处理后的机械性能和正火相比，不仅强度高，而且塑性、韧性也较好，如下表所示。这和它们的组织形态有关。

工艺	机械性能				组织
	σ_b/MPa	$\delta/\%$	$\alpha_k/\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$	HB/kgf/mm ²	
正火	700~800	12~20	500~800	163~220	细片状P+F
调质	750~850	20~25	800~1200	210~250	$S_{\text{回}}$

- 随着回火温度提高，碳钢的硬度、强度降低，塑性提高。但回火温度太高，则塑性会有所下降。



钢的硬度随回火温度的变化



钢机械性能与回火温度的关系

5、淬火回火的工艺缺陷

- 一、淬火变形
- 二、淬火裂纹
- 三、硬度不足
- 四、软点
- 五、组织缺陷

§ 5-2 钢的表面热处理—表面淬火

一、目的

- 表面淬火是强化金属材料表面的重要手段之一。
- 凡是能够通过淬火进行强化的金属材料，原则上都可进行表面淬火。
- 经过表面淬火的工件不仅提高了表面硬度、耐磨性，而且与经过适当预先热处理的心部组织相配合，可以获得很好的强韧性、高的疲劳强度。

二、特点

- 1、工艺简单、强化效果显著；
- 2、热处理变形小，淬火后可以不加工或少加工；
- 3、设备的机械化、自动化程度高，生产效率高，适合于自动化生产；
- 4、加热速度和冷却速度快，组织细小，性能优越；
- 5、表面形成压应力，有利于疲劳性能的提高。

三、方法

- 1、感应加热淬火（高频、工频）
- 2、火焰加热表面淬火
- 3、电阻加热表面淬火
- 4、激光热处理
- 5、电子束热处理

四、应用

- 含碳量在0.40~0.50%的中碳调质钢及球墨铸铁是最适宜于表面淬火的材料。

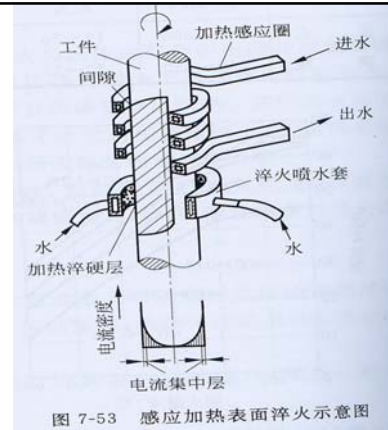


图 7-53 感应加热表面淬火示意图

§ 5-3 钢的化学热处理

一、定义

- 钢的化学热处理和表面淬火一样均是对材料或工件的表面进行强化处理。所不同的是化学热处理会改变工件表面或表层的化学成分和显微组织，而表面淬火则只改变表面的组织，不改变成分。
- 广义的化学热处理包括表面扩散渗入及表面合金覆层两大类。本节只讨论前者。
- 所谓化学热处理就是将工件放在一定的活性介质中加热，使非金属或金属元素扩散到工件表层中、改变表面化学成分，从而改变表面组织与性能的热处理工艺。

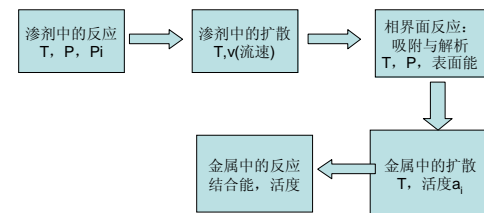
二、方法

常用的化学热处理方法有：渗碳、氮化（渗氮）、软氮化、碳氮共渗、渗金属、多元共渗等。

三、化学热处理的作用：

- 1、提高渗层硬度及耐磨性；（渗碳、氮、硼、钒、铌、铬、硅等）
- 2、改善零件间抗咬合性及提高抗擦伤能力；（渗硫、磷化、渗氮、蒸汽处理等）
- 3、提高表面抗氧化及耐高温性能；（渗铝、铬、镍等）
- 4、提高工件表面抗蚀性。（渗硅、铬、氮、多元共渗等）

四、化学热处理的基本过程



五、渗碳

1、定义

渗碳是目前应用最广泛的一种化学热处理方法。它是渗碳介质在工件表面产生的活性碳原子，经过表面吸收和扩散将碳渗入低碳钢或低碳合金钢工件表层，使其达到共析或略高于共析成分时的含碳量，以便将工件淬火和低温回火后，其表层的硬度、强度，特别是疲劳强度和耐磨性，较心部都有显著的提高，而心部仍保持一定的强度和良好的韧性。

2、渗碳温度

一般在850~950℃，常用930℃。

碳原子在奥氏体内的扩散系数：

$$D_C^{\gamma} = (0.07 + 0.06 \times C\%) \exp\left(-\frac{32000}{RT}\right)$$

$$\text{或 } D_C^{\gamma} = (0.04 + 0.08 \times C\%) \exp\left(-\frac{31500}{RT}\right)$$

3、渗碳时间

渗碳时间由渗碳层的厚度决定。

$$x \propto \sqrt{4Dt}$$

4、渗碳方法

- (1) 固体渗碳：粒状或膏状渗碳剂中渗碳
- (2) 液态介质渗碳：盐浴渗碳
- (3) 气体渗碳：有机含碳气氛中进行。
- (4) 特殊渗碳：真空渗碳、离子渗碳、液态床渗碳

5、渗碳用钢：低碳钢

一般情况下，渗碳适合低碳（合金）钢，含碳量为0.15~0.30%。如20#，20CrMnTi等。渗碳后表面含碳量约0.9~1.2%。

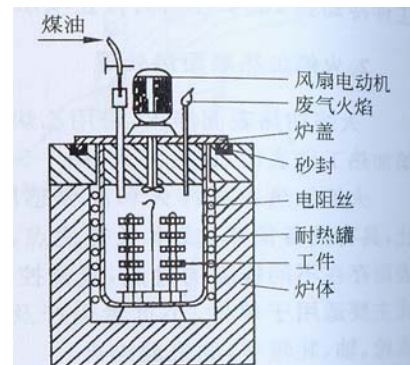


图 7-55 气体渗碳装置示意图

6、渗碳后的热处理及组织

(1) 直接淬火

对本质细晶钢的渗碳件，渗碳时晶粒不易长大，因此渗碳后可将零件直接从渗碳炉内取出淬火（或慢冷至 A_{c1} 以上淬火），以获得表层所要求的硬度。

淬火后，表层为：高碳马氏体+残余奥氏体+渗碳体

心部为：低碳马氏体（淬透）

回火后，表层为：高碳回火马氏体+渗碳体+残余奥氏体

(150~200℃) 心部为：低碳回火马氏体

(2) 一次淬火

将零件渗碳后空冷或淬火，然后再重新加热进行淬火的方法。

A_{c3} 以上淬火+回火，表层：回火马氏体+残余奥氏体

心部：低碳回火马氏体（淬透）

A_{c1} 以上淬火+回火，表层：回火马氏体+残余奥氏体+渗碳体

心部：低碳回火马氏体（淬透）+铁素体

(3) 两次淬火

将零件渗碳后缓冷至室温，再进行两次淬火。第一次淬火的目的是细化心部晶粒和消除表层网状渗碳体，淬火的温度高于心部 A_{c3} 温度。此时，表层晶粒粗大，为了细化表层晶粒需进行第二次淬火，淬火温度选择在表层的 A_{c1} 温度以上，此加热温度不影响心部的晶粒度。

渗碳后空冷，表层：网状渗碳体+珠光体

心部：铁素体+珠光体

第一次淬火后，表层：马氏体+残余奥氏体

心部：低碳马氏体

第二次淬火+低温回火后

表层：细小回火马氏体+碳化物+残余奥氏体

心部：铁素体+低碳回火马氏体

6、渗碳后的性能

表面硬度可达到HRC58~63。心部HRC33~48。

- 一般来说和表面淬火相比，渗碳工艺获得的零件的耐磨性更为优越，而心部组织的性能要相对较差（主要是强度较低）。所以中碳钢调质处理+表面淬火适合于承重零件，渗碳适合于耐磨性要求高的零件。

7、应用

轴类零件；齿轮等要求耐磨和承载的零件。

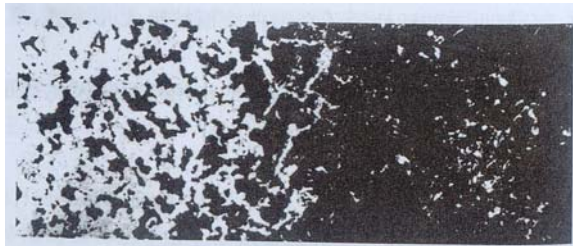


图 7-56 低碳钢渗碳缓冷后的显微组织

六、氮化

1、定义

将氮渗入钢件表面的热处理工艺称为钢的氮化或渗氮。

2、特点

氮化能使钢件表面获得比渗碳更高的表面硬度（可高达HV950~1200）、耐磨性、疲劳强度、红硬性及抗咬合性。

氮化在钢件表面形成稳定的化合物层，所以氮化还可以提高钢件的抗蚀性。

氮化温度低，一般480~600℃，常用560℃，而且氮化后通常炉冷，因此氮化后工件变形很小。

但氮化周期长，一般几十甚至上百小时、成本高、氮化层较薄，一般0.5mm、且脆性较高，使氮化件不能承受太高的接触应力和冲击载荷。

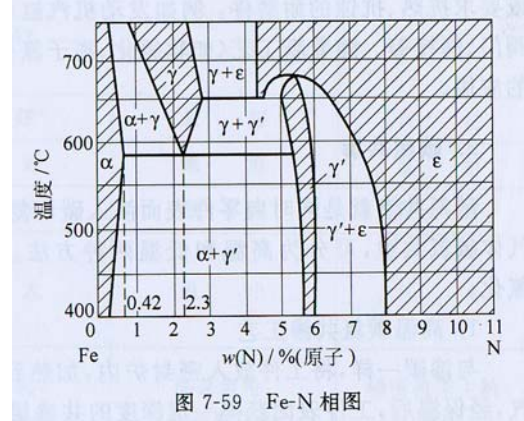
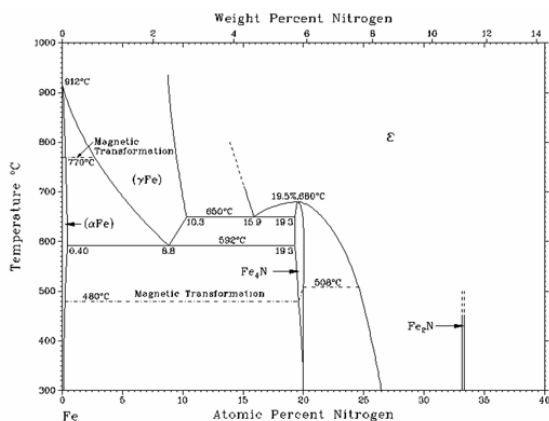
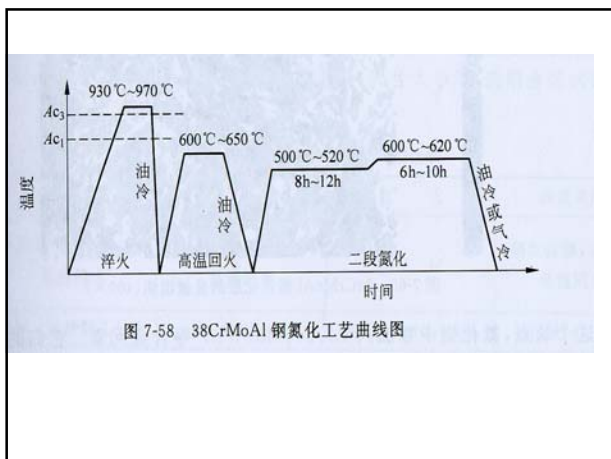


图 7-59 Fe-N 相图



3、氮化用钢

中碳合金钢，典型38CrMoAlA，
30CrMo，18Cr2Ni4WA

4、氮化后的组织

表层：氮化物

心部：回火索氏体

§ 5-4 钢的热处理新技术

- 一、碳氮共渗
- 二、多元共渗
- 三、真空热处理
- 四、保护气氛热处理
- 五、形变热处理
- 六、离子轰击热处理
- 七、复合热处理