

第4章 热处理工艺

热处理工艺种类很多，大体上可分为普通热处理（或叫整体热处理），表面热处理，化学热处理，特殊热处理等。

4.1 钢的普通热处理

4.1.1 退火

将金属或合金加热到适当温度，保温一定时间，然后缓慢冷却（一般为随炉冷却），的热处理工艺叫做退火。

退火的实质是将钢加热到奥氏体化后进行珠光体转变，退火后的组织是接近平衡后的组织。

退火的目的：

- 降低钢的硬度，提高塑性，便于机加工和冷变形加工；
- 均匀钢的化学成分及组织，细化晶粒，改善钢的性能或为淬火作组织准备；
- 消除内应力和加工硬化，以防变形和开裂。

退火和正火主要用于预备热处理，对于受力不大、性能要求不高的零件，退火和正火也可作为最终热处理。

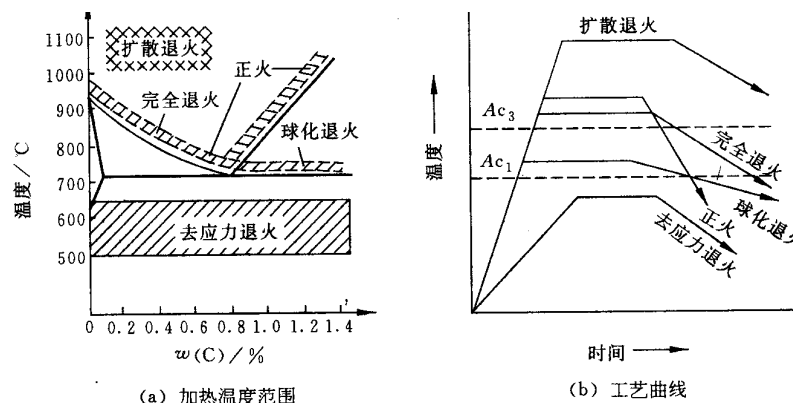
一、退火方法的分类

常用的退火方法，按加热温度分为：

临界温度（ Ac_1 或 Ac_3 ）以上的相变重结晶退火：完全退火、扩散退火、不完全退火、球化退火

临界温度（ Ac_1 或 Ac_3 ）以下的退火：再结晶退火、去应力退火

碳钢各种退火和正火工艺规范示意图：



1、完全退火

工艺：将钢加热到 Ac_3 以上 $20 \sim 30$ ，保温一段时间后缓慢冷却（随炉）以获得接近平衡组织的热处理工艺（完全 A 化）。

完全退火主要用于亚共析钢（ $w_c=0.3\sim 0.6\%$ ），一般是中碳钢及低、中碳合金钢铸件、锻件及热轧型材，有时也用于它们的焊接件。低碳钢完全退火后硬度偏低，不利于切削加工；过共析钢加热至 Ac_{cm} 以上 A 状态缓慢冷却退火时， Fe_3C

会以网状沿A晶界析出，使钢的强度、硬度、塑性和韧性显著降低，给最终热处理留下隐患。

目的：细化晶粒、均匀组织、消除内应力、降低硬度和改善钢的切削加工性。

亚共析钢完全退火后的组织为 F+P。

实际生产中，为提高生产率，退火冷却至 500 左右即出炉空冷。

2、等温退火

完全退火需要的时间长，尤其是过冷 A 比较稳定的合金钢。如将 A 化后的钢较快地冷至稍低于 A_{r1} 温度等温，是 A 转变为 P，再空冷至室温，可大大缩短退火时间，这种退火方法叫等温退火。

工艺：将钢加热到高于 Ac_3 (或 Ac_1) 的温度，保温适当时间后，较快冷却到珠光体区的某一温度，并等温保持，使 $A \rightarrow P$ 然后空冷至室温的热处理工艺。

目的：与完全退火相同，转变较易控制。

适用于 A 较稳定的钢：高碳钢 ($w(c) > 0.6\%$)、合金工具钢、高合金钢(合金元素的总量 $> 10\%$)。等温退火还有利于获得均匀的组织 and 性能。但不适用于大截面钢件和大批量炉料，因为等温退火不易使工件内部或批量工件都达到等温温度。

3、不完全退火

工艺：将钢加热到 $Ac_1 \sim Ac_3$ (亚共析钢)或 $Ac_1 \sim Ac_{cm}$ (过共析钢)经保温后缓慢冷却以获得近于平衡组织的热处理工艺。

主要用于过共析钢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。球化退火是不完全退火的一种

4、球化退火

使钢中碳化物球状化，获得粒状珠光体的一种热处理工艺。

工艺：加热至 Ac_1 以上 20 ~30 温度，保温时间不宜太长，一般以 2~4h 为宜，冷却方式通常采用炉冷，或在 A_{r1} 以下 20 左右进行较长时间等温。

主要用于共析钢和过共析钢，如碳素工具钢、合金工具钢、轴承钢等。过共析钢经轧制、锻造后空冷的组织是片层状的珠光体与网状渗碳体，这种组织硬而脆，不仅难以切削加工，在以后的淬火过程中也容易变形和开裂。球化退火得到球状珠光体，在球状珠光体中，渗碳体呈球状的细小颗粒，弥散分布在铁素体基体上。球状珠光体与片状珠光体相比，不但硬度低，便于切削加工，而且在淬火加热时，奥氏体晶粒不易粗大，冷却时变形和开裂倾向小。如果过共析钢有网状渗碳体存在时，必须在球化退火前采用正火工艺消除，才能保证球化退火正常进行。

目的：降低硬度、均匀组织、改善切削加工性为淬火作组织准备。

球化退火工艺方法很多，主要有：

a)一次球化退火工艺：将钢加热到 Ac_1 以上 20 ~30 ，保温适当时间，然后随炉缓慢冷却。要求退火前原始组织为细片状珠光体，不允许有渗碳体网存在。

b)等温球化退火工艺：将钢加热保温后，随炉冷却到略低于 A_{r1} 的温度进行等温(一般在 A_{r1} 以下 $10 \sim 30$)。等温结束后随炉缓冷到 500 左右即出炉空冷。有周期短，球化组织均匀，质量易控等优点。

c)往复球化退火工艺。

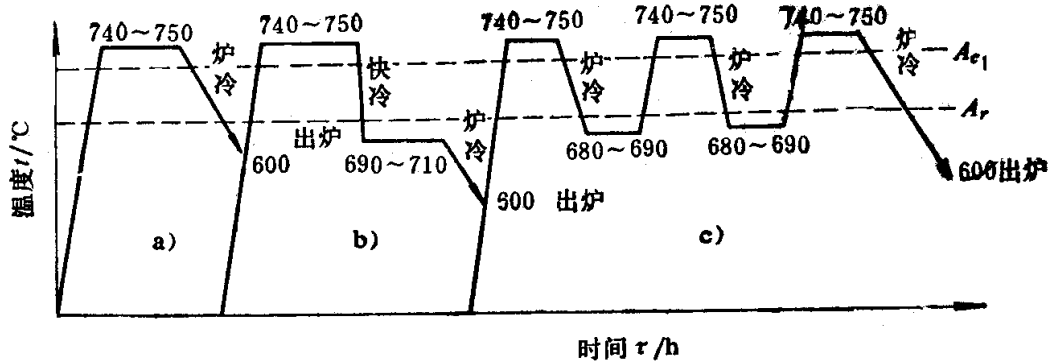


图10-2 碳素工具钢 (T7~T10) 的几种球化退火工艺

5、扩散退火(均匀化退火)

工艺：将钢锭、铸件或锻坯加热至略低于固相线的温度下长时间保温，然后缓慢冷却以消除化学成分不均匀现象的热处理工艺。

目的：消除铸锭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。

扩散退火的加热温度很高，通常为 A_{c3} 或 A_{cm} 以上 $100 \sim 200$ ，具体温度视偏析程度及钢种而定，保温时间一般为 $10 \sim 15$ 小时。扩散退火后需完全退火及正火处理，以细化组织。

应用于一些优质合金钢及偏析较严重的合金钢铸件及钢锭。

6、去应力退火

工艺：将钢件加热至低于 A_{c1} 的某一温度(一般为 $500 \sim 650$)，保温，然后随炉冷却。

去应力退火温度低于 A_1 ，因此去应力退火不引起组织变化。

目的：消除残余内应力。

7、再结晶退火

再结晶退火又称中间退火，是把冷变形后的金属加热到再结晶温度以上保持适当时间，使变形晶粒重新转变为均匀等轴晶粒而消除加工硬化和残余应力的热处理工艺。

再结晶现象的产生，首先必须有一定量的冷塑性变形，其次必须加热到一定温度以上。发生再结晶现象的最低温度称为最低再结晶温度。一般金属材料的最低再结晶温度为：

$$T_{\text{再}} = 0.4T_{\text{熔}}$$

再结晶退火的加热温度应比最低再结晶温度高 $100 \sim 200$ (钢材的最低再结晶温度为 450 左右)，适当保温后缓慢冷却。

二、退火的工艺及应用

名称	加热温度	加热时间	冷却方法	目的和应用
扩散退火	$A_{c3} + (150 \sim 250 \text{ } ^\circ\text{C})$ 加热速度: 100~ 120 $^\circ\text{C}/\text{h}$	2~3 min/mm (一般需 10~ 20 h)	工件随炉缓慢 冷到 350 $^\circ\text{C}$ 出炉	(1) 消除钢锭或 铸件中化学成分不 均匀性和减少偏析 程度 (2) 消除铸钢件 内应力,改善切削加 工性能
完全退火	$A_{c3} + (30 \sim 50 \text{ } ^\circ\text{C})$ (过共析钢不 用)	碳素钢: 1.5~1.8 min/mm 合金钢: 1.8~2.0 min/mm	随炉冷到 500 ~600 $^\circ\text{C}$ 出炉空 冷,亦可用砂冷 冷却速度: 碳素钢:100~ 200 $^\circ\text{C}/\text{h}$ 合金钢:50~ 100 $^\circ\text{C}/\text{h}$	(1) 降低硬度,改 善切削加工性能 (2) 增加韧性 (3) 细化晶粒 (4) 消除内应力
不完全退 火	$A_{c1} + (30 \sim 50 \text{ } ^\circ\text{C})$ 亚共析碳钢: 770~800 $^\circ\text{C}$	碳素钢: 1.5~1.8 min/mm 合金钢: 1.8~2.0 min/mm	随炉冷到 500~ 600 $^\circ\text{C}$ 出炉空冷, 亦可用砂冷 冷却速度: 碳素钢:100~ 200 $^\circ\text{C}/\text{h}$ 合金钢:50~ 100 $^\circ\text{C}/\text{h}$	主要用于共析钢 和过共析钢 (1) 改变珠光体 组织,使珠光体再结 晶 (2) 消除内应力 (3) 降低硬度,改 善切削加工性能
球化退火	退火: $A_{c1} +$ (20~30 $^\circ\text{C}$) 球化: $A_{r1} -$ (10~30 $^\circ\text{C}$)	碳素钢: 1.5~1.8 min/mm 合金钢: 1.8~2.0 min/mm	(1) 以 20~ 50 $^\circ\text{C}/\text{h}$ 冷到球化 温度 (2) 球化后,炉 冷到 450~500 $^\circ\text{C}$ 出炉空冷	主要用于共析钢 和过共析钢 (1) 降低硬度,改 善加工性能 (2) 为淬火作好 组织准备 (3) 提高工件淬 火、回火后的耐磨性
等温退火	退火: $A_{c3} +$ (30~50 $^\circ\text{C}$)	碳素钢: 1.5~1.8 min/mm 合金钢: 1.8~2.0 min/mm	较快冷到 A_{r1} 以 下等温,等温时间:	(1) 代替完全退 火,缩短退火周期, 提高生产率 (2) 改善合金钢 的组织 (3) 降低硬度
再结晶退 火	$A_{c1} - (15 \sim 30 \text{ } ^\circ\text{C})$ 通常用 600 $^\circ\text{C}$ 左右温度	3~4 min/mm 总时间不 超过 4~5 h	不大于 50 $^\circ\text{C}/\text{h}$,低 于 300 $^\circ\text{C}$ 出炉空 冷	(1) 降低硬度,改 善切削加工性能 (2) 消除内应力 (3) 淬火后退修 重新淬火的工件

三、退火方法的选用

退火方法的选用一般有以下几个原则：

- 亚共析组织的各种钢一般选用完全退火，为了缩短退火时间，可以选用等温退火；
- 过共析钢一般选用球化退火，要求不高时，可以选用不完全退火。工具钢、轴承钢常选用球化退火。低碳钢或中碳钢的冷挤压件和冷锻件有时也用球化退火；
- 为了消除加工硬化，可以选用再结晶退火；
- 为了消除各种加工过程中所引起的内应力，可以选用去应力退火；
- 有些高级优质合金钢的大型铸钢件，为了改善组织结构和化学成分的不均匀性，常选用扩散退火。

4.1.2 正火

工艺：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 $30 \sim 50$ ，保温适当时间后，在空气中均匀冷却热处理工艺。

正火与完全退火相比：加热温度相同，正火转变速度较快，转变温度较低。相同钢材正火后获得的珠光体型组织较细，钢的强度硬度较高。

正火后的组织：亚共析钢正火后的组织为F+S，共析钢正火后的组织为S，过共析钢正火后的组织为 $Fe_3C_{II}+S$ 。

一、正火的应用

正火的目的是使钢的组织正常化，亦称常化处理，一般应用于以下方面：

i. 作为最终热处理

正火可以细化晶粒，使组织均匀化，减少亚共析钢中铁素体含量，使珠光体含量增多并细化，从而提高钢的强度、硬度和韧性，可作为普通结构零件或大型及复杂零件的最终热处理。

ii. 作为预先热处理

截面较大的合金结构钢件，在淬火或调质处理（淬火加高温回火）前常进行正火，以消除魏氏组织和带状组织，并获得细小而均匀的组织。对于过共析钢可减少二次渗碳体量，并使其不形成连续网状，为球化退火作组织准备。

iii. 改善切削加工性能

低碳钢和低合金钢，退火后硬度偏低，切削加工时宜于“粘刀”，通过正火处理，可以减少自由铁素体，获得细片状P，使硬度提高，可以改善钢的切削加工性。

二、退火和正火的选用

生产上，退火和正火有时可以相互替换，实际选用时可从以下方面考虑：

1. 低碳钢（ $w(C) < 0.25\%$ ）和中碳钢（ $w(C) = 0.25\% \sim 0.5\%$ ），通常采用正火代替退火。较快的冷却速度可防止低碳钢沿晶界析出游离三次渗碳体；用正火可提高钢的硬度，改善低碳钢的切削加工性能；正火细化晶粒，提高低碳钢的强度

接近上限碳量的中碳钢正火后硬度偏高，但尚能进行切削加工，正火成本低生产率高。

2. $w(C)=0.75\%$ 以上的高碳钢或工具钢一般选用球化退火作为预备热处理。如有网状二次渗碳体存在，则应先进行正火。

3. 随着钢中碳和合金元素的增多，过冷 A 稳定性增强，C 曲线右移。一些中碳钢及中碳合金钢正火后硬度偏高，不利于切削加工，应采用完全退火。

三、退火与正火的缺陷及补救措施

退火与正火的缺陷主要有硬度偏高、氧化和脱碳、过热与过烧、金相组织不良等。这些缺陷的补救方法如下：

1、硬度偏高

- (1) 控制冷却速度 冷却速度应根据钢的化学成分、工件大小、装炉量及达到的组织与性能来加以控制，防止冷却速度过快；
- (2) 严格工艺规范，防止加热温度过高或过低；
- (3) 等温退火时要正确选择等温温度，防止等温温度过低；
- (4) 出炉温度不高于 550 ，防止出炉温度过高；
- (5) 保温时间应按不同钢种在 1~2.5min/mm 范围选择，防止装炉量大时保温时间不足。

硬度偏高的工件可在合理的工艺规范下重新进行一次正火或退火。

2、氧化和脱碳

- (1) 对于脱碳层超过加工余量的工件，应在渗碳气氛中增碳，最好在可控气氛中增碳；
- (2) 可在工件表面涂硼砂；
- (3) 在周期电炉内喷入适量的氯化锌溶液，使工件表面形成氧化膜，保护工件在热处理时不再氧化；
- (4) 防止温度过高，保温时间过长。有效加热区的温度差最大为 ± 20 。

3、过热与过烧

以发生过热的工件，可采用正确的规范再进行一次正火或退火，重新细化晶粒。发生过烧的工件无法使用，只能报废；

4、金相组织不良

金相组织不良是指退火或正火后存在魏氏组织、带状组织、网状组织。

- (1) 消除魏氏组织的方法：进行一次完全退火或正火，将针状组织完全溶于奥氏体中，再进行正确的冷却；
- (2) 消除网状组织的方法：亚共析钢采用正火处理，快冷使铁素体来不及从奥氏体的边界析出；过共析钢可用正火消除网状碳化物，但硬度偏高，故再进行一次球化退火或等温退火；
- (3) 消除带状组织的方法：热加工常留有明显的碳化物带状组织偏析，可采用正火或完全退火来解决，以改善二次碳化物的形态。

4.1.3 淬火

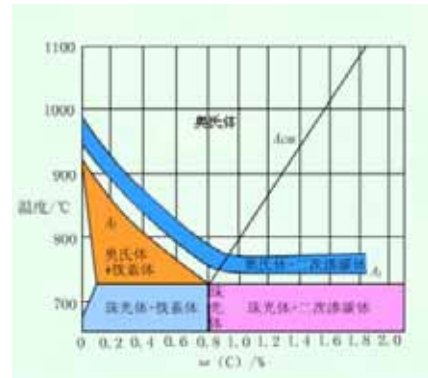
工艺：钢加热到相变温度以上（亚共析钢为 Ac_3 以上 $30 \sim 50$ ；共析钢和过共析钢为 Ac_1 以上 $30 \sim 50$ ），保温一定时间后快速冷却以获得马氏体组织的热处理工艺称为淬火。

淬火的主要目的：是使 A 化后的工件获得尽量多的马氏体并配以不同温度的回火获得各种需要的性能。

1. 淬火工艺

(1) 淬火温度范围：

a. 亚共析钢 Ac_3 以上 $30 \sim 50$ ，淬火得到细针状的马氏体组织。但淬火温度过高，会引起奥氏体晶粒粗化，淬火后获得粗大的 M，使钢脆化。若加热温度过低（在 $Ac_1 \sim Ac_3$ 之间），则淬火组织中存在未溶铁素体，将降低淬火钢的强度和硬度。



b. 共析钢或过共析钢 Ac_1 以上 $30 \sim 50$

- 超过 Ac_{cm} 碳化物将全部溶入 A 种，使 A 含碳量增加，降低钢的 M_s 和 M_f 点，淬火后 A' 量增多，降低钢的硬度和耐磨性；
- 淬火温度过高，A 晶粒粗化、含碳量又高，易得到粗片（针）状马氏体；
- 高温加热淬火应力大、氧化脱碳严重，增大钢件的变形和开裂。
- 加热至 Ac_1 以上两相区时，组织中会保留少量二次渗碳体，有利于硬度和耐磨性的提高，并降低 A 的碳含量，改变 M 的形态，降低 M 的脆性。并可减少淬火后残余奥氏体的量。

选用淬火加热温度时，对不同工件、不同性能要求应区别对待。尺寸较大，形状简单，不易变形及开裂、变形要求不严以及用分级淬火和等温淬火冷却的工件，可选用上限温度；对于尺寸较小、形状复杂、易变形开裂、要求变形小的工件，淬火加热温度选用下限。合金钢可根据具体钢种，淬火温度可推荐温度上限或更高一些，但应根据具体情况适当调整。

(2) 淬火加热保温时间

为了使工件内外各部分均匀完成组织转变、碳化物溶解及奥氏体的充分均匀化，就必须在淬火加热温度保温一段时间。淬火加热保温时间与工件的化学成分、原始组织、形状尺寸、加热设备及介质、装炉量等有关。具体可参照经验公式：

$$t = akD$$

t：保温时间，min；

a：保温时间系数，min/mm；

k：工件装炉方式修正系数；

D：工件有效厚度，mm。

具体可参数见下表。

表 2-5 加热系数 α (min/mm)

材 料		加热温度及炉型		< 600 °C	> 750 ~ 900 °C	800 ~ 900 °C	1 100 ~ 1 300 °C
				箱式炉 预热	盐浴加热 或预热	箱式或井 式炉加热	高温盐浴 炉加热
碳 钢	直径 < 500 mm				0.3 ~ 0.4	1.0 ~ 1.2	
	直径 > 500 mm				0.4 ~ 0.45	1.2 ~ 1.5	
合金钢	直径 < 50 mm				0.45 ~ 0.5	1.2 ~ 1.5	
	直径 > 50 mm				0.5 ~ 0.55	1.5 ~ 1.8	
高合金钢				1 ~ 1.5	0.35 ~ 0.5		0.17 ~ 0.25
高 速 钢					0.3 ~ 0.5		0.14 ~ 0.25







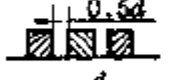
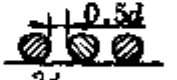


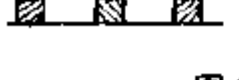
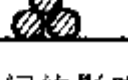
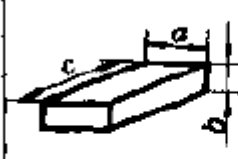
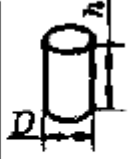

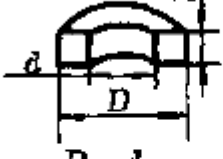

钢坯安排方式	装炉系数	钢坯安排方式	装炉系数
	1		1
	1.4		1
	4		2
	2.2		1.4
	2		1.3
	1.8		1.7

图 2-4 装炉状况对加热时间的影响

表 2-6 常见形状工件的有效厚度

工件形状					
	$b < a < c$	$D < h$	$D > h$	$\frac{D-d}{2} < h$	$\frac{D-d}{2} > h$
有效厚度	b	D	h	$\frac{D-d}{2}$	h

有效厚度的确定：

- 圆柱体以直径作为有效厚度；
- 板件以其厚度作为有效厚度；
- 矩形截面工件以其短边作为有效厚度；

- 筒类工件以其壁厚作为有效厚度；
- 球体以球直径的 0.6 倍作为有效厚度。

(3) 淬火冷却介质

工件在淬火介质中的冷却过程大致分为三个阶段，其示意图如图所示。

第一阶段(蒸汽膜阶段):在淬火工件的最初瞬间,高温工件表面形成一层蒸汽膜,由于蒸汽膜导热不良,工件与淬火介质的直接传热隔绝,冷却是缓慢的。

第二阶段(沸腾阶段):连续冷却时,蒸汽膜发生破裂,淬火介质在工件表面发生沸腾,液体汽化带走大量热量,这时冷却剧烈,这一阶段直至工件冷却到淬火介质的沸腾为止。

第三阶段(对流阶段):工件温度降到介质的沸腾点以下时,汽化停止,工件的热量主要靠对流散热,冷速又缓慢。

一般要蒸汽膜阶段越短越好,沸腾冷却要剧烈些,使工件在 650 ~550 温度区间能迅速冷却。对流阶段的开始温度要稍高一些,以利于减小工件的变形和防止开裂。

理想淬火介质的冷却能力应当如图所示。650 以上缓慢冷却,降低淬火热应力;650 ~400 快速冷却,以通过过冷 A 最不稳定的区域,避免发生 P 或 B 转变;400 以下 Ms 点附近温度区域,应当缓慢冷却以尽量减少 M 转变时产生的组织应力。

水:需要快冷的 650 ~400 区间,其冷却速度较小,而在需要慢冷的 M 转变温度区,其冷却速度又太大,易造成淬火工件的变形和开裂。

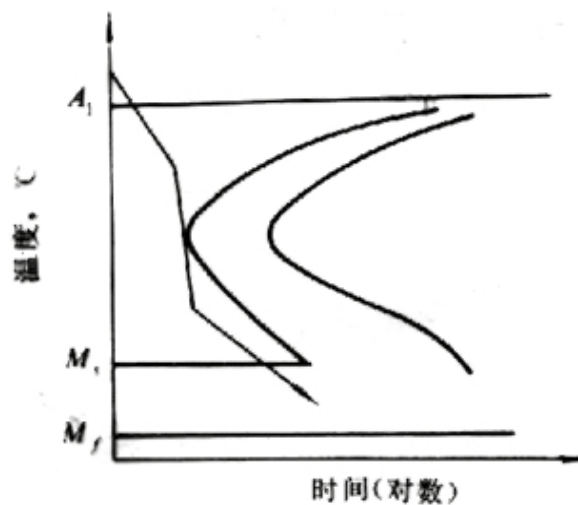
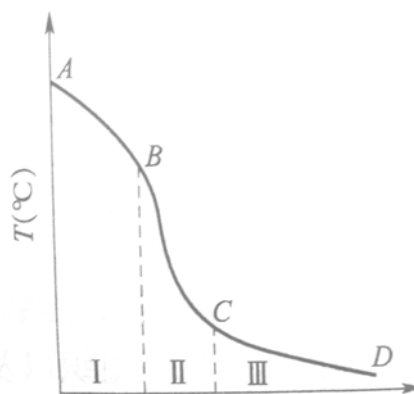
适用于尺寸不大、形状简单的碳钢工件淬火。

油:优点是低温区(300 ~200)的冷却速度比水小得多从而大大降低淬火工件的组织应力,减小工件的变形和开裂;缺点是高温区(650 ~550)冷却能力也低不利于钢的淬硬,一般作为合金钢的淬火介质。

盐浴:为了减少零件淬火时的变形,盐浴也常用作淬火介质。其特点是:沸点高,冷却能力介于水和油之间。常用于处理形状复杂、尺寸较小、变形要求严格的工具等。

(4) 淬火方法

淬火时为了最大限度地减小变形和避免开裂,除了正确的进行加热及合理选



理想淬火曲线示意图

表 2-7 常用淬火介质及其冷却性能

名 称	最大冷却速度时		平均冷却速度 ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$)		备 注
	所在温度 ($^{\circ}\text{C}$)	冷却速度 ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$)	650~ 500 $^{\circ}\text{C}$	300~ 200 $^{\circ}\text{C}$	
静止自来水, 20 $^{\circ}\text{C}$	340	775	135	450	冷却速度 系由 $\phi 20$ mm 银球所测 各冷却速 度均系根据 有关冷却特 性曲线估 算的
静止自来水, 40 $^{\circ}\text{C}$	285	545	110	410	
静止自来水, 60 $^{\circ}\text{C}$	220	275	80	185	
10% NaCl 水溶液, 20 $^{\circ}\text{C}$	580	2 000	1 900	1 000	
15% NaOH 水溶液, 20 $^{\circ}\text{C}$	560	2 830	2 750	775	
5% Na_2CO_3 水溶液, 20 $^{\circ}\text{C}$	430	1 640	1 140	820	
10 号机油, 20 $^{\circ}\text{C}$	430	230	60	65	
10 号机油, 80 $^{\circ}\text{C}$	430	230	70	55	
20 号机油, 20 $^{\circ}\text{C}$	500	120	100	50	

择冷却介质外, 还应根据工件的材料、形状、尺寸和技术要求选择合理的淬火方法。

常用的淬火方法冷却曲线如图所示。

1) 单介质淬火 (单液淬火法)

将钢件奥氏体化后, 在单一淬火介质中冷却到室温的处理, 称为单介质淬火。

单介质淬火的优点是操作简单, 易实现机械化和自动化, 但综合冷却特性不理想, 容易产生硬度不足和开裂等淬火缺陷, 只适用于小尺寸且形状简单的工件, 大件易产生较大的变形和开裂。

2) 双介质淬火 (双液淬火)

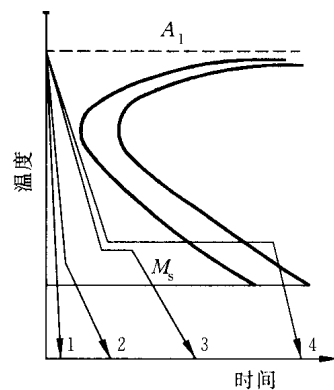
将 A 状态的工件在冷却能力强的淬火介质(水)中冷却至接近 M_s 点温度时, 再立即转入冷却能力较弱的淬火介质(油)中冷却, 直至完成 M 转变。适用于形状复杂和截面不均匀工件的淬火。

双介质淬火的优点是内应力小, 变形及开裂小, 缺点是操作困难, 不易掌握。

3) 分级淬火

将 A 状态的工件首先淬入略高于钢的 M_s 点的盐浴或碱浴炉中保温, 当工件内外温度均匀后, 再从炉中取出空冷至室温, 完成 M 转变。

这种淬火方法由于工件内外温度均匀并在缓慢冷却条件下完成 M 转变, 不仅减少了淬火热应力, 而且显著降低了组织应力, 有效地减少了工件淬火变形和



1—单介质淬火; 2—双介质淬火;
3—分级淬火; 4—等温淬火

图 2-83 不同淬火方法示意图

开裂。同时还克服了双介质淬火出水入油时间难以控制的缺点。

4) 等温淬火

将 A 化后的工件淬入 M_s 点以上某温度盐浴中等温保持足够时间,使之转变为下 B 组织,而后于空气中冷却的淬火方法,是分级淬火的进一步发展,不同的是等温淬火获得下 B 组织。下 B 的强度硬度较高而韧性良好。等温淬火可显著提高钢的综合机械性能。等温温度比分级淬火温度高,减少了工件与淬火介质的温差,从而减少了淬火热应力;又因 B 的比容比 M 小,而且工件内外温度一致,淬火组织应力小。等温淬火可显著减小工件的变形和开裂。

表 2-10 加热淬火方法与应用

淬火方法	淬火冷却方法	目的与应用
单液淬火	(1) 工件加热后淬入一种冷却剂中 (2) 形状复杂者可以预冷后淬入	(1) 获得马氏体组织,使工件具有高的硬度和耐磨性 (2) 操作简单,适宜于大批量生产 缺点是水淬易产生变形开裂某些钢用油淬又不易达到所需的硬度
双液淬火	(1) 工件加热后,先淬入冷却能力强的淬火剂,然后淬入冷却能力较缓慢的淬火剂中冷却 (2) 通常采用水-油或水-空气 (3) 由水到油,所需要的时间不超过 1~2 s	(1) 可以减少工件产生淬火的内应力、变形和裂纹的危险 (2) 此法适用于形状较复杂的碳钢工件,特别适用于高碳钢工件
分级淬火	(1) 工件加热后,先淬入低温盐槽,盐槽温度高于马氏体转变点 20~30 °C 均温后,取出空冷,在槽中不得使奥氏体分解 (2) 另一方法:将工件淬入到 150~180 °C 盐槽,均温后,取出空冷	(1) 淬火应力小,比双液淬火能更有效地减小变形和开裂 (2) 分级淬火适合于处理形状复杂的工件,如高碳钢丝锥,中碳合金钢精密齿轮等
等温淬火	(1) 工件加热后,淬入低温盐槽,使奥氏体完全分解,取出空冷 (2) 等温淬火得到的组织为下贝氏体+马氏体 (3) 一般不需要回火	(1) 可以减小零件淬火后表面与心部的温差,减少热应力 (2) 此法用来处理要求变形最小的工件

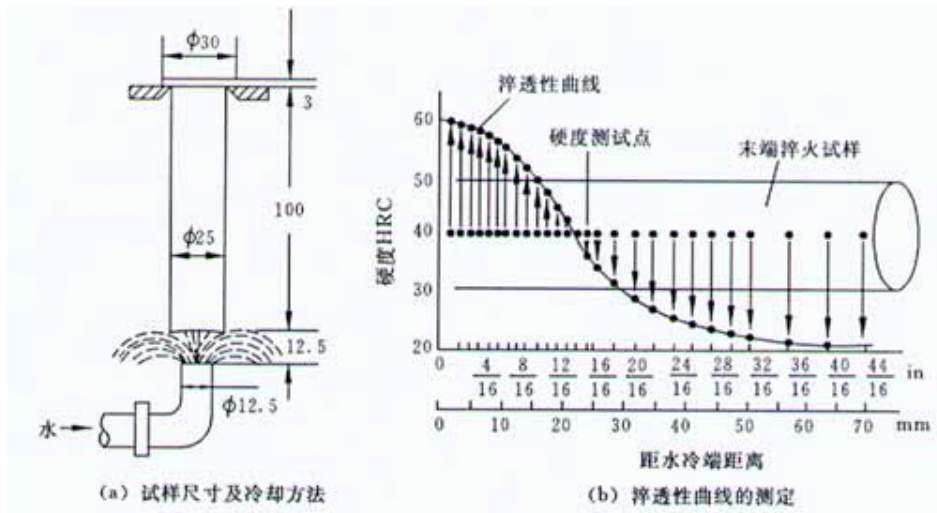
2. 钢的淬透性

钢淬火时形成马氏体的能力叫做钢的淬透性，常用钢在规定条件下，获得马氏体组织的深度来衡量。容易形成 M 的钢淬透性好，反之则差。钢的淬透性主要取决于合金元素的含量和种类。

一、钢的淬透性测定

淬透性可用“末端淬火法”来测定(见 GB225-63)。将标准试样($\Phi 25 \times 100$ mm)加热奥氏体化后，迅速放入末端淬火试验机的冷却孔中，喷水冷却。规定喷水管内径 12.5 mm，水柱自由高度 65 ± 5 mm，水温 $20 \sim 30$ 。显然，喷水端冷却速度最大，距末端沿轴向距离增大，冷却速度逐渐减小，其组织及硬度亦逐渐变化。在试样侧面沿长度方向磨一深度 0.2-0.5 mm 的窄条平面，然后从末端开始，每隔一定距离测量一个硬度值，即可测得试样沿长度方向上的硬度变化，所得曲线称为淬透性曲线。

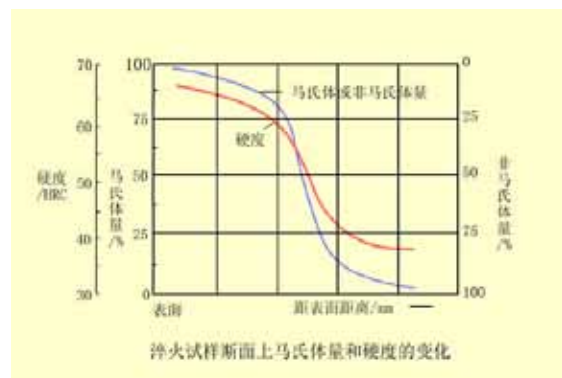
实验测出的各种钢的淬透性曲线均收集在有关手册中。同一牌号的钢，由于化学成分和晶粒度的差异，淬透性曲线实际上为有一定波动范围的淬透性带。



用末端淬火法测定钢的淬透性

根据 GB225-63 规定，钢的淬透性值用 $J \frac{HRC}{d}$ 表示。其中 J 表示末端淬火的淬透性， d 表示距水冷端的距离，HRC 为该处的硬度。例如，淬透性值 $J \frac{42}{5}$ ，即表示距水冷端 5 mm 试样硬度为 42 HRC。

淬透性的大小用钢在一定条件下淬火获得淬透层深度表示。一定尺寸的工件在一定介质中淬火，其淬透层深度与工件截面各点的冷却速度有关。如果工件截面中心的冷却速度高于钢的临界淬火速度，工件就会淬透。然而工件淬火时表面冷却速度较大，

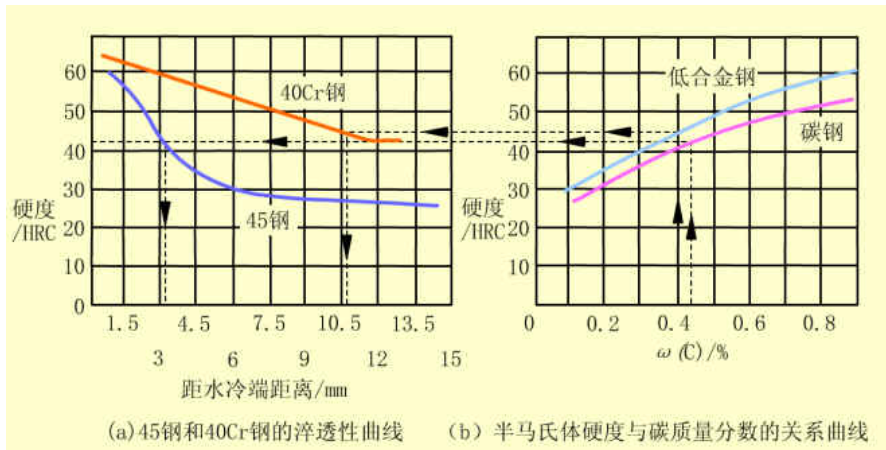


心部冷却速度最小，由表面至心部冷却速度逐渐降低。只有冷却速度大于临界淬火速度的工件外层部分才能得到 M，这就是工件的淬透层。而冷却速度小于临界淬火速度的心部只能得到非 M 组织，这就是工件的未淬透区。

按理淬透层的深度应是全部淬成 M 的区域。但实际工件淬火后从表面至心部 M 数量是逐渐减少的，从金相组织上看，淬透层和未淬透区并无明显的界限，淬火组织中混入少量非 M 组织其硬度值并无明显变化。当淬火组织中 M 和非 M 各占一半时，即所谓半马氏体区时，显微观察极为方便，硬度变化最为剧烈。为测试方便，在实际生产中，通常采用从淬火工件表面至半 M 区(马氏体和非马氏体组织各占一半)距离作为淬透层深度。在同样淬火条件下，淬透层深度越大，则反映钢的淬透性越好。

二、淬透性曲线的应用

利用淬透性曲线，可比较不同钢种的淬透性。淬透性是钢材选用的重要依据之一。利用半马氏体硬度曲线和淬透性曲线，找出钢的半马氏体区所对应的距水冷端距离。该距离越大，则淬透性越好。图中可知 40Cr 钢的淬透性比 45 钢要好。

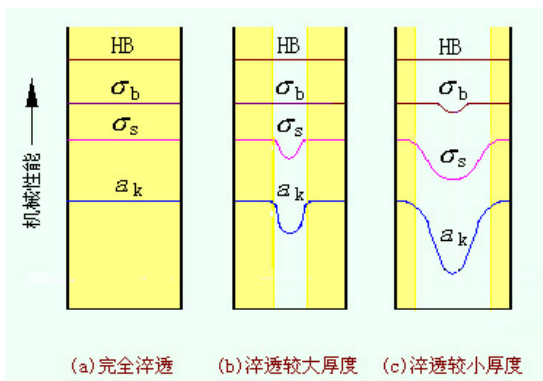


淬透性不同的钢材经调质处理后，沿截面的组织和机械性能差别很大。如直径为 30 mm 的 40CrNiMo 钢棒整个截面都是回火索氏体，机械性能均匀，强度高，韧性好。而直径为 30 mm 的 40 钢的表层为回火索氏体，心部为片状索氏体+铁素体，心部强韧性较差。截面较大、形状复杂以及受力较苛刻的螺栓、拉杆、锻模、锤杆等工件，要求截面机械性能均匀，应选用淬透性好的钢。而承受弯曲或扭转载荷的轴类零件、外层受力较大，心部受力较小，可选用淬透性较低的钢种。

三、影响淬透性的因素：

(1) 碳含量

在碳钢中，共析钢的临界冷速最小，淬透性最好；亚共析钢随碳含量减少，临界冷速增加，淬透性降低；过共



析钢随碳含量增加，临界冷速增加，淬透性降低。

(2) 合金元素

除钴以外，其余合金元素溶于奥氏体后，降低临界冷却速度，使 C 曲线右移，提高钢的淬透性，因此合金钢往往比碳钢的淬透性要好。

(3) 奥氏体化温度

提高奥氏体化温度，将使奥氏体晶粒长大、成分均匀，可减少珠光体的生核率，降低钢的临界冷却速度，增加其淬透性。

(4) 钢中未溶第二相

钢中未溶入奥氏体中的碳化物、氮化物及其它非金属夹杂物，可成为奥氏体分解的非自发核心，使临界冷却速度增大，降低淬透性。

钢材经调质处理后，淬透性好的钢棒整个截面都是回火索氏体，机械性能均匀，强度高，韧性好，而淬透性差的钢心部为片状索氏体+铁素体，只表层为回火索氏体，心部强韧性差。

3. 钢的淬硬性

淬硬性是指钢在理想条件下淬火成为马氏体后所能达到的最高硬度。钢的淬硬性主要取决于钢的碳含量。低碳钢淬火的最高硬度值低，淬硬性差；高碳钢的最高硬度值高，淬硬性好。

两对概念的本质区别

1. 淬透性和淬硬性的区别

淬透性表示钢淬火时获得马氏体的能力，它反映钢的过冷 A 的稳定性，即与钢的临界冷却速度有关。过冷 A 越稳定，临界淬火速度越小，钢在一定条件下淬透层深度越深，则钢的淬透性越好。而淬硬性表示钢淬火时的硬化能力，用淬成马氏体可能得到的最高硬度表示。它主要取决于 M 中的含碳量。M 中含碳量越高，钢的淬硬性越高。

淬透性与淬硬性并无必然联系，例如高碳工具钢的淬硬性高，但淬透性很低；而低碳合金钢的淬硬性不高，但淬透性却很好。

2. 淬透性和实际条件下淬透层深度的区别

淬透性是钢的一种属性，相同 A 化温度下的同一钢种，其淬透性是确定不变的。其大小用规定条件下的淬透层深度表示。而实际工件的淬透层深度是指具体条件下测定的半 M 区至工件表面的深度，它与钢的淬透性、工件尺寸及淬火介质的冷却能力等许多因素有关。例如，同一钢种在相同介质中淬火，小件比大件淬透层深；一定尺寸的同一钢种，水淬比油淬淬透层深；工件的体积越小，表面积越小，则冷却速度越快，淬透层越深。决不能说，同一钢种水淬比油淬时淬透性好，小件淬火时比大件淬火时淬透性好。淬透性是不随工件形状、尺寸和介质冷却能力而变化的。

4. 淬火常见缺陷及防止措施

1) 氧化和脱碳

2) 过热和过烧

3) 硬度不足和软点

- 硬度不足：硬度不足主要是由于加热温度过低、保温时间不足、冷却速度过低或表面脱碳等原因造成的。一般情况下，可采用重新淬火的方法予以消除，但淬火前要进行一次退火或正火处理。
- 软点：当采用水作为冷却介质时，工件表面因被传热能力很差的蒸汽膜保住而造成冷却缓慢，所以淬火后工件的软点比较严重。存在氧化皮和脱碳的部位也会出现软点。为了防止软点的产生，应该使工件进行无氧化、无退碳加热。当在能产生蒸汽膜的介质中淬火时，应该很好的搅动淬火介质，并使淬火工件在淬火介质中做适当运动。

4) 变形和开裂

零件在热处理时，内部应力超过材料的屈服极限而引起零件的尺寸和形状的变化称为变形。零件在热处理时，内部应力超过材料的抗拉极限而引起零件产生裂纹的现象称为开裂。

变形是热处理中较难避免的缺陷，一般只是控制零件的变形量，超过变形量时可用校正方法纠正。开裂是必须避免的缺陷，零件一旦开裂，就无法挽救，只有报废。

变形和开裂都是由内应力引起的。零件内应力分为热应力和组织应力。

热应力是在加热和冷却过程中，零件内外层加热和冷却速度不同造成的内应力。

由于零件内外层温度不一致，致使零件内外热胀冷缩的程度也不相同；内外层温差越大，热应力也越大。零件在加热时，表面温度要高于心部，表面膨胀快，但受到心部的阻碍，故表面受压应力而心部受拉应力；零件在冷却时正相反，表面受拉应力而心部受压应力。一旦加热和冷却过程中热应力超过材料的屈服极限和抗拉极限，都会引起零件的变形和开裂。所以必须严格控制零件的加热、冷却速度，尤其是导热性差的材料，更要注意加热、冷却速度的影响。

组织应力是在加热或冷却过程中，由于零件内部组织发生转变的时间不一致而造成的内应力。

由于淬火冷却过程中同时存在两种应力，共同作用于工件，所以变形的结果看哪一种应力占优势。实际上淬火工件在生产中的变形时非常复杂的，受多种因素的影响。要根据情况综合分析，找出主要矛盾，采取合理的措施加以预防和消除。

防止变形及裂纹的措施：

- 合理选择淬火加热温度：在保证淬硬性的前提下，一般应尽量选择低的淬火温度。但对于一些高碳合金钢，可通过适当提高淬火温度来降低 M_s 点，增大参与奥氏体量，控制淬火变形。
- 合理进行加热：尽量做到均匀加热，减少加热时的热应力。对于大截面、

高合金钢、形状复杂，变形要求高的工件，一般应经过预热，或限制加热速度。另工件在炉中应自由悬挂，禁止用外力强制装夹。

- 选择合理的工夹具，进行适当的绑捆。对易产生裂纹的部位应采取适当的防护措施，如包扎铁皮、石棉绳、堵孔等。如非工作孔可用石棉绳、耐火泥堵塞，降低冷却速度，减小淬火应力和变形；截面急变处用铁丝或石棉绳绑捆，尖角处用铁皮套上，容易变形的部分，如槽形工件，用螺钉等加以机械固定。

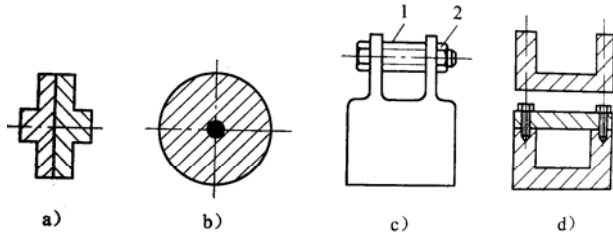


图 2—27 淬火前的保护措施

a) 点焊 b) 用耐火泥堵塞 c) 机械加固 d) 设加强肋
1—套筒 2—螺栓

装炉时应注意：

- a) 允许不同材料但具有相同加热温度和加热速度的工件装入同一炉中加热；
- b) 截面大小不同的工件装入同一炉时，大件应放在炉膛里面，以便小件先出炉；

- c) 工件装炉时，应放在炉内均匀温区，多方面采取措施，力求提高均温程度；

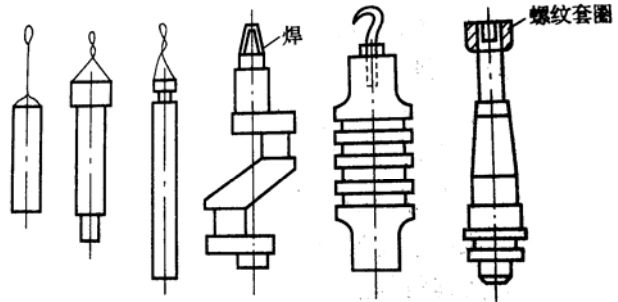


图 2—28 细长工件吊挂方法示例

- d) 装炉时必须把工件放在装料架或炉底板上，不准将工件直接抛入炉内，以免碰坏零件或损坏设备；

- e) 入炉工件均匀干燥，无油污；

- f) 细长工件应尽量垂直吊挂，以免变形；对某些件要合理绑扎，以免因自重而变形，如图所示。

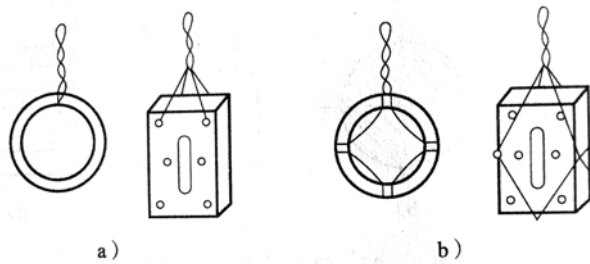
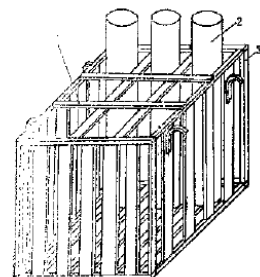


图 2—29 合理绑扎工件示例

a) 不正确扎法

- g) 箱式炉中装入工件时，一般为单层排列，工件距离为 10~30mm，小件允许堆放，但应酌量增加保温时间，每炉的工件数应基本一致。
- h) 试棒与工件同时装炉，应放在又代表性位置。



- 正确选择冷却方法和冷却介质：尽可能采用预冷淬火、分级淬火和分级冷却方法。预冷淬火对细长或薄的工件减少变形又较好的效果。

一般应依据下列原则：

- 碳素结构钢、碳素工具钢多采用水淬；
- 碳钢厚度在 5~6mm 以下及形状复杂的工件可采用油淬；
- 合金钢工件多采用油淬；
- 对形状简单、厚度较大的低、中合金钢工件，形状复杂、厚度较大的碳钢工件，前者为了保证淬硬性，后者为了防止变形和开裂，可采用水-油双介质淬火。

- 正确掌握淬火操作方法：正确选择工件淬火介质的方式，保证工件得到均匀的冷却，并沿最小阻力方向进入冷却介质，将冷却最慢的面朝液体运动。当工件冷至 M_s 点以下时，应停止运动。

具体应遵守以下基本操作方法：

- 工件从炉中取出时，必须保持平衡，防止摇晃或相互撞击。除细小的工件外，一般不必立即投入淬火介质中，可在冷却池上静止几秒钟，既可达到垂直淬入的目的，又可起到预冷的效果。

- 工件浸入介质时，应保证得到均匀的冷却，以最小阻力的方向淬入，常用的方法有：

- 轴类工件及圆柱形、长方形和扁平工件应垂直淬入，并保持上下窜动；
- 板状工件应横向浸入淬火介质；
- 薄片件应垂直淬入，大型薄片件更应快速垂直浸入，速度越快，变形越小；
- 套筒件应沿轴线浸入淬火介质；
- 一端大，一端小的工件，应大端先浸入。横向厚薄不均匀的工件，应尽可能从厚的一面向下淬火；
- 有凹面的工件，应使凹面朝上淬入，具有十字形和 H 形的工件，不能垂直浸入淬火介质，

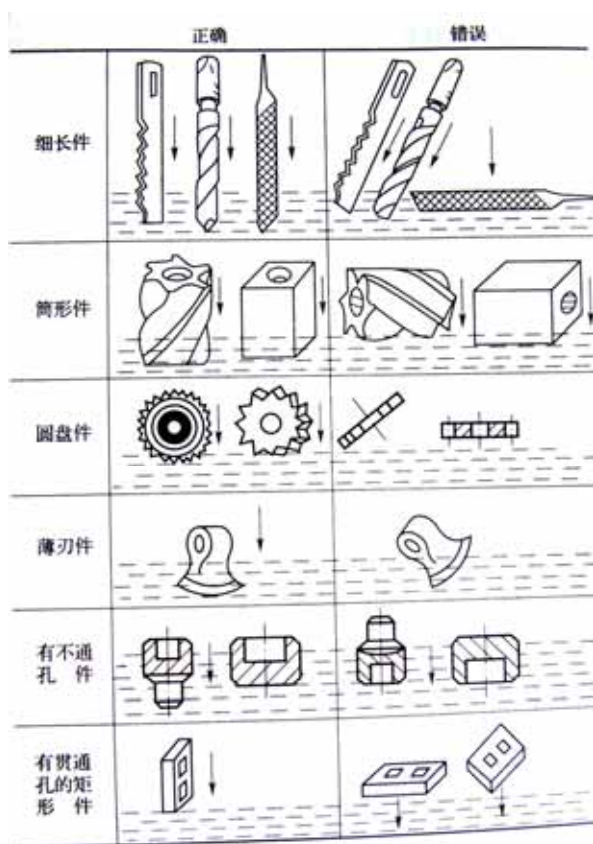


图 2-30 几种不同形状工件淬火时浸入方式

应斜着淬入为好；

- 带槽的工件，槽应向上倾斜浸入淬火介质。长方形有通孔的工件，可倾斜浸入淬火介质，以增加孔部的冷却效果；
- 有不通孔的工件，应使孔朝上淬入，以利于排除孔内气体。

c) 工件在淬火介质中的正确运动方向

- 工件浸入淬火介质后，仅做直线运动，适用于大型工件快速吊挂淬火，如图 a 所示；
- 工件上下运动并略向一个方向移动，以提高冷却速度，如图 b 所示。

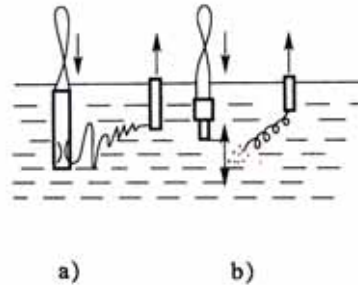


图 2—31 工件浸入淬火剂后的几种运动方式

4.1.4 回火

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。

淬火和回火不可分割，淬火钢一般不直接使用，必须进行回火。这是因为：

1. 淬火后得到的是性能很脆的 M，存在内应力，易变形开裂；
2. 淬火 M 和 A' 不稳定会发生分解，导致零件尺寸的变化；
3. 为获得要求的强度、硬度、塑性和韧性。

一、 淬火钢回火时组织的变化

淬火后钢的组织是不稳定的，具有向稳定组织转变的自发倾向。回火加速了自发转变的过程。淬火钢在回火时，随着温度的升高，组织转变可分四个阶段。

第一阶段（80 ~ 200）：马氏体分解

马氏体内过饱和的碳原子，以 ϵ 碳化物形式析出，使马氏体的过饱和度降低。 ϵ 碳化物是弥散度极高的薄片状组织。这种马氏体和 ϵ 碳化物的回火组织称回火马氏体。此阶段钢的淬火内应力减小，韧性改善，但硬度并未明显降低。

第二阶段（200 ~ 300）：残余奥氏体分解

在马氏体分解的同时，降低了对残余奥氏体的压力，使其转变为下贝氏体。这个阶段转变后的组织是下贝氏体和回火马氏体。淬火内应力进一步降低，但马氏体分解造成硬度降低，被残余奥氏体分解引起的硬度升高所补偿，故钢的硬度降低并不明显。

第三阶段（300 ~ 400）：马氏体分解完成和渗碳体的形成

马氏体继续分解，直至过饱和的碳原子几乎全部由固溶体内析出。与此同时， ϵ 碳化物逐渐转变为极细的稳定碳化物 Fe_3C ，此阶段到 400 全部完成，形成尚未再结晶的针状铁素体和细球状渗碳体的混合组织，称为回火托氏体。此时钢的淬火内应力基本消除，硬度有所降低。

第四阶段 (400 以上): 固溶体的再结晶与渗碳体的聚集长大

温度高于 400 后, 固溶体发生回复与再结晶, 同时渗碳体颗粒不断聚集长大。当温度高于 500 时, 形成块状铁素体与球状渗碳体的混合组织, 称为回火索氏体。钢的硬度、强度不断降低, 但韧性却明显改善。

必须指出: 以上四个阶段是在不同温度范围进行的, 但四个温度范围有交叉, 所以钢在回火以后所表现出的性能是这些变化的综合结果。

二、回火的分类

根据回火温度的高低, 一般将回火分为三种:

(1) 低温回火

回火温度为 150 — 250 , 回火组织为回火 M+A'。

在低温回火时, 从淬火马氏体内部会析出碳化物, 马氏体的过饱和度减小。部分残余奥氏体转变为下贝氏体, 但量不多。所以低温回火组织为回火 M+A'。下贝氏体量少可忽略。其中回火马氏体(回火 M)由极细的碳化物和低过饱和度的 α 固溶体组成。

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 58 HRC ~ 64 HRC)和高耐磨性。和淬火 M 相比, 回火 M 既保持了钢的高强度、高硬度和良好的耐磨性, 又适当提高了韧性。

主要用于处理各种高碳钢工具、模具、滚动轴承以及渗碳和表面淬火的零件。

(2) 中温回火

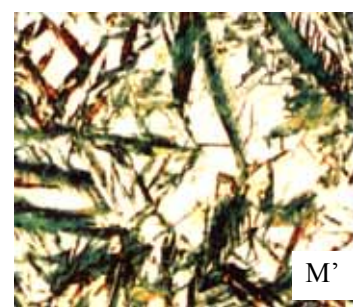
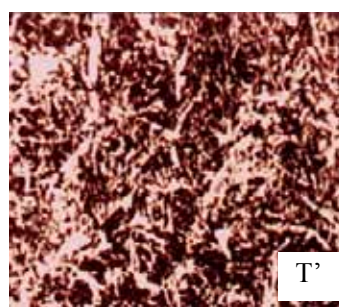
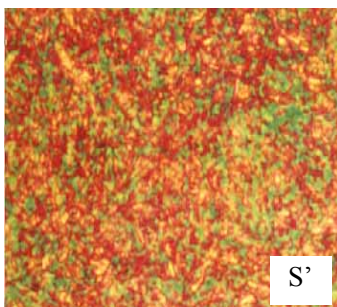
回火温度为 350 ~ 500 , 回火组织为回火屈氏体(回火 T)。回火屈氏体(回火 T)为铁素体基体与大量弥散分布的细粒状渗碳体的混合组织。

回火屈氏体具有高的弹性极限, 较高的强度和硬度 (35 HRC ~ 45 HRC), 良好的塑性和韧性。中温回火主要用于各种弹簧零件和热锻模具。

(3) 高温回火

回火温度为 500~650 , 回火组织为回火 S, 回火 S 为细粒状渗碳体和铁素体的混合组织。与正火 S 比较: 回火 S 综合机械性能最好, 即强度、塑性和韧性都比较好。

淬火加高温回火称为调质处理。调质处理应用于各种重要机器结构件, 特别是受交变载荷的零件, 如连杆、轴、齿轮等。也可作为某些精密工件如量具、模具等的预先热处理。



钢在回火时会产生回火脆性现象，即在 250 ~ 400 和 450 ~ 650 两个温度区间回火后，钢的冲击韧性明显下降。

三、钢回火时性能的变化：

● 钢的硬度随回火温度的变化
随着回火温度的升高，碳钢的强度、硬度降低，塑性提高。但回火温度太高，则塑性会有所下降。

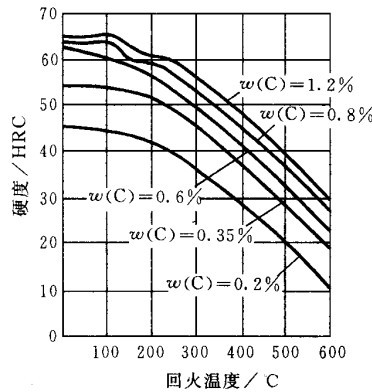


图 2-89 钢的硬度随回火温度的变化

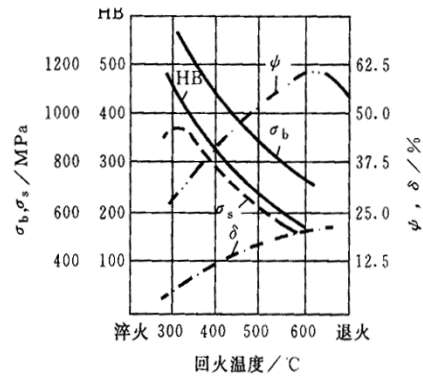


图 2-90 40 钢机械性能与回火温度的关系

● 钢的机械性能与回火温度的关系

淬火钢在回火过程中，回火温度-回火组织-钢的性能之间存在着——对应关系。

回火温度越高，钢的硬度越低，如图所示。在 200 以下回火时，由于 ϵ -碳化物的弥散析出，硬度下降甚微；而高碳钢在 100 左右回火时，硬度甚至稍有提高。在 200 ~ 250 回火时，由于残余奥氏体转变为下贝氏体或回火马氏体，高碳钢的硬度几乎停止下降。当回火温度超过 250 以后，由于 ϵ -碳化物转变为渗碳体以及渗碳体的聚集长大，钢的硬度随回火温度的升高直皇直线下降。在较低温度（200-300）回火时，因淬火引起的内应力被消除，钢的屈服强度和抗拉强度都得到提高。在 300 ~ 400 温度范围内回火时，钢的弹性极限达到最高值。进一步提高回火温度，钢的强度将迅速下降，钢的塑性和韧性一般都随着回火温度的升高而增长。在 600 左右回火时，钢的塑性、韧性与强度达到良好配合，即可获得较好的综合机械性能。

淬火钢经回火获得的托氏体和索氏体组织与过冷奥氏体直接分解所得到的托氏体和索氏体相比，具有较优的性能；在硬度相同时，前者具有较高的屈服强度、塑性和韧性。这主要是因为组织形态不同所致。

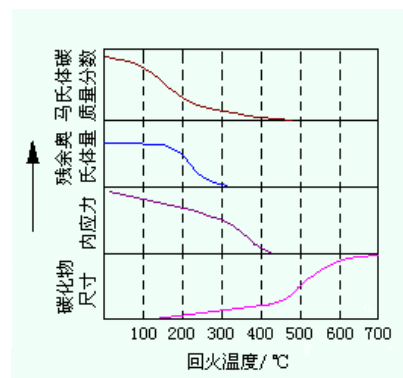
● 钢回火过程中 M 的碳质量分数、残余奥氏体量、内应力和碳化物尺寸随回火温度的变化

四、回火脆性

淬火钢回火时，其冲击韧性并非随着回火温度的升高而单调地提高，在 250 ~ 400 和 450 ~ 650 两个温度区间内出现明显下降，这种脆化现象称为钢的回火脆性。

1. 低温回火脆性

淬火钢在 250 ~ 400 温度范围内回火出现的



脆性称为低温回火脆性，也叫第一类回火脆性。几乎所有的淬火钢在 300 左右回火时都会出现这种脆性。一般认为，低温回火脆性是由于马氏体分解在其晶界上析出断续的薄壳状渗碳体，降低了晶界断裂强度，使裂纹容易沿着晶界形成与扩展，因而导致脆性断裂。若进一步提高回火温度，可使碳化物聚集球化，从而减轻和消除界面脆化，钢的韧性又得到恢复和提高，此后，即使再一次在 300 左右回火，脆性不会重新出现。因此又称低温回火脆性为不可逆回火脆性，为了防止低温回火脆性，通常的办法是避免在脆化温度范围内回火。

2. 高温回火脆性

淬火钢在 500-650 温度范围内回火出现的脆性称为高温回火脆性，又叫第二类回火脆性。这类回火脆性主要出现在含 Cr、Ni、Mn、Si 等合金元素的钢中。当淬火钢在 550 左右加热保温后缓慢冷却时，会出现明显的脆化现象，若快速冷却，脆化现象消失或受到抑制。若将已产生脆化的钢重新加热到 550 左右保温并快速冷却时，可消除脆性；反之，若将已消除脆性的钢重新加热到高温回火温区，然后缓慢冷却，则脆性又会再次出现。因此高温回火脆性又称可逆回火脆性。

一般认为，高温回火脆性的产生主要与 Sb、Sn、P、As 等有害杂质元素在原奥氏体晶界偏聚有关。这些杂质削弱了奥氏体晶界上原子间的结合，从而降低了晶界断裂强度，而 Ni、Cr、Mn 等合金元素不但促进上述杂质元素向原奥氏体晶界偏聚，所以增大了回火脆性倾向。

在钢中加入 Mo、W 等合金元素，能抑制杂质元素向晶界偏聚，可有效减轻或消除这类回火脆性倾向。

工件回火后如果因冷却不当而产生第二类回火脆，可重新加热到高温回火温度，保温后再快速冷却，便可消除。

五、回火工艺的制定

确定回火工艺的参数主要有：回火温度、回火时间和回火后的冷却速度。

1、回火温度

淬火钢应根据力学性能要求确定回火温度和保温时间，通常是以硬度要求来选择的。因为硬度的检测简便易行，且强度和硬度在一定范围内存在对应关系。实践证明，主要材料选择合理，工艺合理，回火后达到要求的硬度，其它力学性能一般均能满足使用要求。

2、回火时间

回火保温时间与工件的有效厚度、回火温度及加热介质有关。回火时间见下表。生产中看通过观察工件表面的回火颜色，来大致控制和判断工件回火温度。下表给出了工件温度与其火色的对应关系。

3、回火冷却

一般回火后的冷却对工件性能影响不大，所以回火后一般时空气冷却，对某些重要工件，为避免回火后产生新的热应力，最好缓慢冷却。一些件为避免第二

类回火脆，应快冷。

表 4-28 常用钢根据硬度选用的回火温度

钢 号	回 火 温 度 /°C							
	25~30 HRC	30~35 HRC	35~40 HRC	40~45 HRC	45~50 HRC	50~55 HRC	55~60 HRC	>60 HRC
35	520	460	420	370	290	<170		
45	550	500	450	380	320	240	<200	
50	560	510	460	390	330	240	180	
60	620	600	520	400	360	310	250	180
T8、T8A	580	530	470	430	380	320	230	<180
T10、T10A	580	540	500	450	400	340	260	<200
T12、T12A	580	540	490	430	380	340	260	<200
40Cr	650	580	480	450	360	200	<160	
30CrMnSi	620	530	500	480	230	200		
35CrMo	600	550	480	400	300	200		
42CrMo	620	580	500	400	300		180	
40CrNi	580	550	450	420	320	200		
40CrNiMoA	640	600	540	480	420	320		
38CrMoAlA		680	630	530	430	320	200	
40MnVB	600	460						
65Mn	600	640	500	440	380	300	230	<170
60Si2Mn	660	620	590	520	430	370	300	180
50CrV	650	560	500	440	400	280	180	
GCr9		550	500	460	410	350	270	<180
GCr15	600	570	520	480	420	360	280	<180
GCr15SiMn				480	420	350	280	<180
Cr6WV		700	650	600	540	450	250	<180
9Mn2V				500	400	320	250	<180
9SiCr	670	620	580	520	450	380	300	100
CrMn		590	540	490	430	340	280	<180
CrWMn	660	640	600	540	500	380	280	<220
Cr12		720	680	630	560	520	250	<180
Cr12MoV		750	700	650	600	550		525 (二次)
		740	670	630	600	530	300	<180
Cr12MoV		770	710	650	610	500 或 580		550

表 2-13 回火保温时间参考表

低温回火 (150~250℃)						
有效厚度/mm	<25	25~50	50~75	75~100	100~125	125~150
保温时间/min	30~60	60~120	120~180	180~240	240~270	270~300
中、高温回火 (250~650℃)						
有效厚度/mm	<25	25~50	50~75	75~100	100~125	125~150
保温时间 /min	盐炉	20~30	30~45	45~60	75~90	90~120
	空气炉	40~60	70~90	100~120	150~180	180~210
					210~240	

表 2-14 工件温度与其火色的对应关系

温度 (℃)	花色	温度 (℃)	花色
650~750	暗樱桃色	830~880	菊黄微红色
750~780	樱红色	880~1 050	淡菊黄色
780~800	淡樱红色	1 050~1 150	黄色
800~830	淡红色		

六、合金元素对钢热处理的影响

(一) 合金元素对回火转变的影响

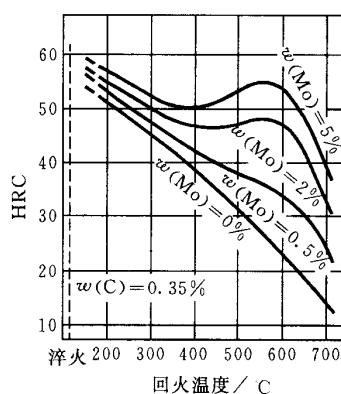
1. 提高回火稳定性

合金元素在回火过程中推迟马氏体的分解和残余奥氏体的转变(即在较高温度才开始分解和转变),提高铁素体的再结晶温度,使碳化物难以聚集长大,因此提高了钢对回火软化的抗力,即提高了钢的回火稳定性。提高回火稳定性作用较强的合金元素有:V、Si、Mo、W、Ni、Co等。

2. 产生二次硬化

一些Mo、W、V含量较高的高合金钢回火时,硬度不是随回火温度升高而单调降低,而是到某一温度(约 400)后反而开始增大,并在另一更高温度(一般为 550

左右)达到峰值。这是回火过程的二次硬化现象,它与回火析出物的性质有关。当回火温度低于 450 时,钢中析出渗碳体;在 450 以上渗碳体溶解,钢中开始沉淀出弥散稳定的难熔碳化物 Mo_2C 、 W_2C 、VC等,使硬度重新升高,称为沉淀硬化。回火时冷却过程中残余奥氏体转变为马氏体的二次淬火也可导致二次硬化。



碳质量分数为 0.35% 钼钢的回火温度与硬度关系曲线

产生二次硬化效应的合金元素

产生二次硬化的原因	合金元素
残余奥氏体的转变	Mn、Mo、W、Cr、Ni、Co、V
沉淀硬化	V、Mo、W、Cr、Ni、Co

仅在高含量并有其他合金元素存在时，由于能生成弥散分布的金属间化合物才有效。

3. 增大回火脆性

和碳钢一样，合金钢也产生回火脆性，而且更明显。这是合金元素的不利影响。在 450 ~ 600 °C 间发生的第二类回火脆性(高温回火脆性)主要与某些杂质元素以及合金元素本身在原奥氏体晶界上的严重偏聚有关，多发生在含 Mn、Cr、Ni 等元素的合金钢中。这是一种可逆回火脆性，回火后快冷(通常用油冷)可防止其发生。钢中加入适当 Mo 或 W(0.5%Mo, 1%W)也可基本上消除这类脆性。

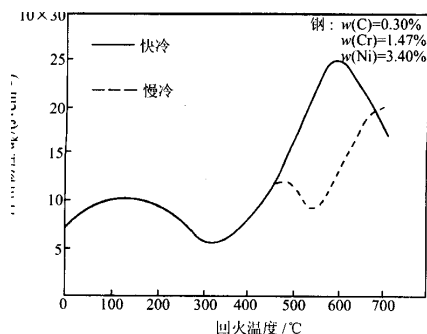


图 2-108 铬镍钢的韧性与回火温度的关系

4.2 钢的表面热处理

表面淬火是采用快速加热的方法使工件表面奥氏体化，然后快冷获得表层淬火组织的一种热处理工艺，或者说是仅对钢的表面加热、冷却而不改变其成分的热处理工艺。

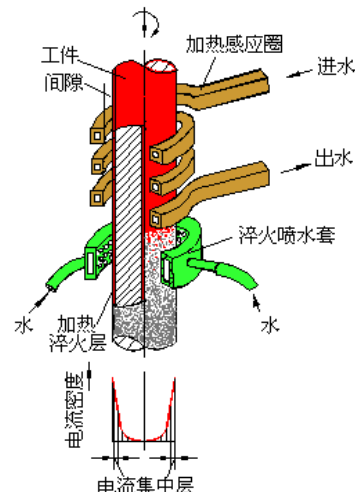
很多承受弯曲、扭转、摩擦和冲击的零件，其表面要比心部承受更高的应力。因此，要求零件表面应具有高的强度、硬度和耐磨性，而心部在保持一定强度、硬度的条件下，应具有足够的塑性和韧性。显然，采用表面淬火的热处理工艺，能使工件达到这种表硬心韧的性能要求。

表面淬火是钢表面强化的方法之一，由于其具有工艺简单、生产率高、热处理缺陷少等优点，因而在工业生产中获得了广泛的应用。根据加热方法的不同，表面淬火可分为感应加热表面淬火、火焰加热表面淬火、电接触加热表面淬火、电解液加热表面淬火及激光加热表面淬火等。其中应用最广泛的是感应加热与火焰加热表面淬火方法。

一、感应加热表面热处理

1. 感应加热的基本原理

感应线圈中通以交流电时，即在其内部和周围产生一与电流相同频率的交变磁场。若把工件置于磁场中，则在工件内部产生感应电流，并由于电阻的作用而被加热。由于交流电的集肤效应，靠近工件表面的电流密度大，而中心几乎为零。工件表面



温度快速升高到相变点以上，而心部温度仍在相变点以下。感应加热就是利用感应电流的集肤效应和热效应将工件表面迅速加热到淬火温度的。

2. 感应加热表面淬火的种类

感应电流透入工件表层的深度主要取决于电流频率，电流频率越高，电流透入深度越浅，则工件表层被加热的厚度越薄，即淬透层深度越小。感应电流透入工件表层的深度 δ (mm) 与电流频率 f (Hz) 之间有如下关系：

$$\delta_{20} = \frac{20}{\sqrt{f}} \quad (20 \text{ 冷态})$$

$$\delta_{800} = \frac{500}{\sqrt{f}} \quad (800 \text{ 热态})$$

δ_{800} 远大于 δ_{20} 。这是因为钢被加热到磁性转变点以上温度时，失去磁性，磁导率急剧下降，导致电流透入深度急剧增加。

根据所用电流频率的不同，感应加热表面淬火可分为三类：

1) **高频感应加热表面淬火**：电流频率为 100 ~ 500kHz，最常用频率为 200 ~ 300kHz，可获淬硬层浓度为 0.5 ~ 2.0mm，主要适用于中、小模数齿轮及中、小尺寸轴类零件的表面淬火。

2) **中频感应加热表面淬火**：电流频率为 500 ~ 10000Hz，最常用频率为 2500 ~ 8000Hz。可获淬硬层深度为 3 ~ 5mm。主要用于要求淬硬层较深的较大尺寸的轴类零件及大中模数齿轮的表面淬火。

3) **工频感应加热表面淬火**：电流频率为 50Hz，不需要变频设备。可获得淬硬层深度为 10 ~ 15mm。适用于轧辊、火车车轮等大直径零件的表面淬火。

感应加热速度极快，一般不进行加热保温，为保证奥氏体化质量，感应加热表面淬火可采用较高的淬火加热温度，一般可比普通淬火温度高 100 ~ 200 。

感应加热表面淬火通常采用喷射介质冷却。工件经表面淬火后，一般应在 180 ~ 200 进行回火，以降低残余应力和脆性。

3. 感应加热表面热处理的特点

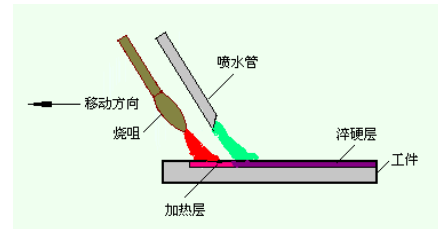
- (1) 高频感应加热时，钢的奥氏体化是在较大的过热度 (A_{c3} 以上 80 ~ 150) 进行的，因此晶核多，且不易长大。
- (2) 表面层淬得马氏体后，由于体积膨胀在工件表面层造成较大的残余压应力，显著提高工件的疲劳强度。
- (3) 因加热速度快，没有保温时间，工件的氧化脱碳少。另外，由于内部未加热，工件的淬火变形也小。
- (4) 加热温度和淬硬层厚度（从表面到半马氏体区的距离）容易控制，便于实现机械化和自动化。

感应加热表面淬火主要适用于中碳和中碳低合金结构钢，例如 40、45、40Cr、40MnB 等。

二、火焰加热表面淬火

火焰加热表面淬火是用乙炔 - 氧或煤气 - 氧等火焰加热工件表面，进行淬火。火焰温度很高（3000 以上），能将工件表面迅速加热到淬火温度。然后，立即用水喷射冷却。调节烧嘴的位置和移动速度，可以获得不同厚度的淬硬层。显然，烧嘴愈靠近工件表面和移动速度愈慢，表面过热度愈大，获得的淬硬层也愈厚。调节烧嘴和喷水管之间的距离也可以改变淬硬层的厚度。火焰加热表面淬火的工艺规范由试验来确定。

火焰加热表面淬火和高频感应加热表面淬火相比，具有设备简单，成本低等优点。但生产率低，零件表面存在不同程度的过热，质量控制也比较困难。因此主要适用于单件、小批量生产及大型零件（如大型齿轮、轴、轧辊等）的表面淬火。



4.3 钢的化学热处理

化学热处理是将钢件置于一定温度的活性介质中保温，使一种或几种元素渗入它的表面，改变其化学成分和组织，达到改进表面性能，满足技术要求的热处理过程。与表面淬火相比，化学热处理后的工件表层不仅有组织的变化，而且有化学成分的变化，所以，化学热处理使工件表层性能提高的程度超过了表面淬火的水平。

化学热处理不仅可以显著提高工件表层的硬度、耐磨性、疲劳强度和耐腐蚀性能，而且能够保证工件心部具有良好的强韧性。因此，化学热处理在工业生产中已获得越来越广泛的应用。

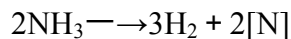
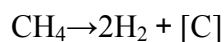
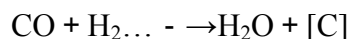
化学热处理种类很多，根据渗入元素的不同，可分为渗碳、渗氮（氮化），碳氮共渗（氰化）、渗硼、渗硫、渗金属、多元共渗等。在机械制造工业中，最常用的化学热处理工艺有钢的渗碳、氮化和碳氮共渗。

一、化学热处理的基本过程

化学热处理过程是一个比较复杂的过程。一般将它看成由渗剂的分解、工件表面对活性原子的吸收和渗入工件表面的原子向内部扩散三个基本过程组成。

1、渗剂的分解

在一定温度下渗剂的化合物发生分解，产生渗入元素的活性原子（或离子）。例如：



值得注意的是，作为化学热处理渗剂的物质必须具有一定的活性，即具有易于分解出被渗元素原子的能力。然而并非所有含被渗元素的物质都能作为渗剂。

例如 N_2 在普通渗氮温度下就不能分解出活性氮原子，因此不能作为渗氮的渗剂。

2、工件表面的吸收

刚分解出的活性原子（或离子）碰到工件时，首先被工件表面所吸附；而后溶入工件表面，形成固溶体；在活性原子浓度很高时，还可能在工件表面形成化合物。

3、工件表面原子向内部扩散

工件表面吸收被渗元素的活性原子后，造成了工件表面与心部的浓度差，促使被渗元素的原子由高浓度表面向内部的定向迁移，从而形成一定深度的扩散层。

上述基本过程都和温度有关。温度愈高，过程进行速度愈快，扩散层愈厚。但温度过高会引起奥氏体粗化，使钢变脆。所以，化学热处理在选定合适的处理介质之后，重要的是确定加热温度，而渗层厚度主要由保温时间来控制。

二、渗碳

将低碳钢放入渗碳介质中，在 900 ~ 950 加热保温，使活性碳原子渗入钢件表面以获得高碳浓度（约 1.0%）渗层的化学热处理工艺称为**渗碳**。在经过适当淬火和回火处理后，可提高表面的硬度、耐磨性及疲劳强度，而使心部仍保持良好的韧性和塑性。因此渗碳主要用于同时受严重磨损和较大冲击载荷的零件，例如各种齿轮、活塞销、套筒等。渗碳钢的含碳量一般为 0.1 ~ 0.3%，常用渗碳钢有 20、20Cr、20CrMnTi 等。

1. 渗碳方法

根据渗碳剂的状态不同，渗碳方法可分为三种，**固体渗碳**、**液体渗碳**和**气体渗碳**。其中液体渗碳应用极少而气体渗碳应用最广泛。

固体渗碳

将零件和固体渗碳剂装入渗碳箱中，加盖并用耐火泥密封（见图），然后放入炉中加热至 900 ~ 950 ，保温渗碳。固体渗碳剂通常是一定粒度的木炭与 15 ~ 20% 酸盐（ $BaCO_3$ 或 Na_2CO_3 ）的混合物。木炭提供所需活性碳原子。碳酸盐起催化作用，反应如下：

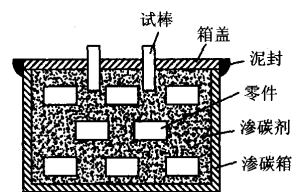


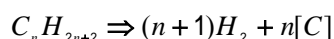
在渗碳温度下 CO 不稳定，在钢件表面分解，生成活性碳原子 $[C]$ （ $2CO \Rightarrow CO_2 + [C]$ ），被钢表面吸收。

固体渗碳的优点是设备简单，容易实现，但生产率低，劳动条件差，质量不易控制，目前应用不多。

气体渗碳

将工件装在密封的渗碳炉中（见图），加热到 900 ~ 950 ，向炉内滴入易分解的有机液体（如煤油、苯、甲醇等），或直接通入渗碳气体（如煤气、石油液化气等），通过下列反应产生活性碳原子，使钢件表面渗碳：





气体渗碳的优点是生产率高，劳动条件较好，渗碳过程可以控制，渗碳层的质量和机械性能较好。此外，还可实行直接淬火。

2. 渗碳工艺

渗碳工艺参数包括渗碳温度和渗碳时间等。

奥氏体的溶碳能力较大，因此渗碳加热到 A_{c3} 以上。温度愈高，渗碳速度愈快，渗层愈厚，生产率也愈高。为了避免奥氏体晶粒过于粗大，渗碳温度一般采用 $900 \sim 950$ 。渗碳时间则决定于对渗层厚度的要求。在 $900 \sim 950$ 温度下，每保温 1 小时，厚度约增加 $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ 。

低碳钢渗碳后缓冷下来的显微组织是表层为 P 和二次渗碳体，心部为原始亚共析钢组织 ($P+F$)，中间为过渡组织。一般规定，从表面到过渡层的一半处为**渗碳层厚度**。一般情况下，渗碳温度为 $900 \sim 950$ 时，一般渗碳气氛条件下，渗碳层厚度 (δ) 主要决定于保温时间 (τ)。即：

$$\delta = K\sqrt{\tau} \quad (K \text{ 为常数，可由实验确定})$$

3. 渗碳后的热处理

(1) 直接淬火

渗碳后直接淬火，由于渗碳温度高，奥氏体晶粒长大，淬火后马氏体较粗，残余奥氏体也较多，所以耐磨性较低，变形较大。为了减少淬火时的变形，渗碳后常将工件预冷到 $830 \sim 850$ 后淬火。

(2) 一次淬火

是在渗碳缓慢冷却之后，重新加热到临界温度以上保温后淬火。心部组织要求高时，一次淬火的加热温度略高于 A_{c3} 。对于受载不大但表面性能要求较高的零件，淬火温度应选用 A_{c1} 以上 $30 \sim 50$ ，使表层晶粒细化，而心部组织无大的改善，性能略差一些。

(3) 二次淬火

对于机械性能要求很高或本质粗晶粒钢，应采用二次淬火。第一次淬火是为了改善心部组织，加热温度为 A_{c3} 以上 $30 \sim 50$ 。第二次淬火是为细化表层组织，获得细马氏体和均匀分布的粒状二次渗碳体，加热温度为 A_{c1} 以上 $30 \sim 50$ 。

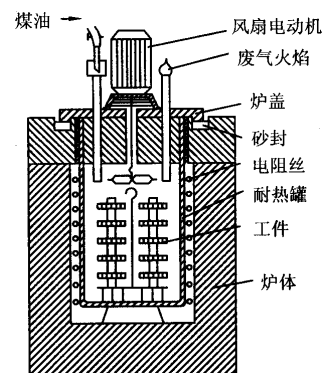
(4) 渗碳、淬火后进行低温 ($150 \sim 200$) 回火以消除淬火应力和提高韧性。

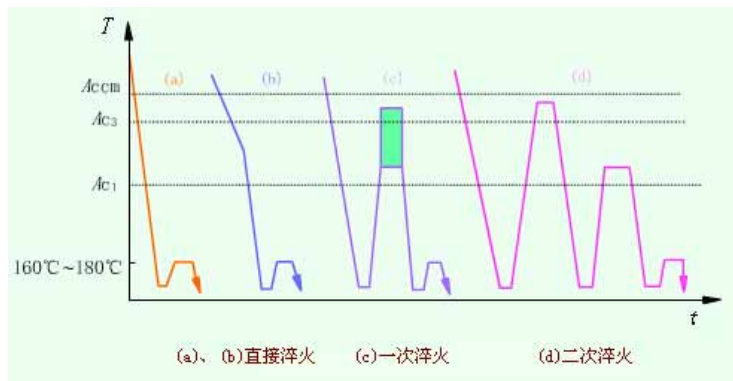
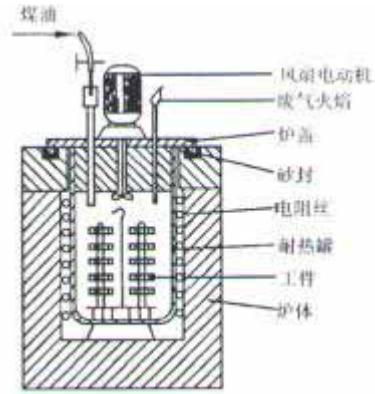
4. 钢渗碳、淬火、回火后的性能

(1) 表面硬度高

达 $58 \text{ HRC} \sim 64 \text{ HRC}$ 以上，耐磨性较好；心部韧性较好，硬度较低，可达 $30 \text{ HRC} \sim 45 \text{ HRC}$ 。

(2) 疲劳强度高





表层体积膨胀大，心部体积膨胀小，结果在表层中造成压应力，使零件的疲劳强度提高。

三、氮化

氮化就是向钢件表面渗入氮的工艺。氮化的目的在于更大地提高钢件表面的硬度和耐磨性，提高疲劳强度和抗蚀性。常用的氮化钢有 35CrAlA, 38CrMoAlA, 38CrWVA1A 等。

1. 工艺

目前广泛应用的是气体氮化。氨被加热分解出活性氮原子 ($2\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{H}_2 + 2[\text{N}]$)，氮原子被钢吸收并溶入表面，在保温过程中向内扩散，形成渗氮层。

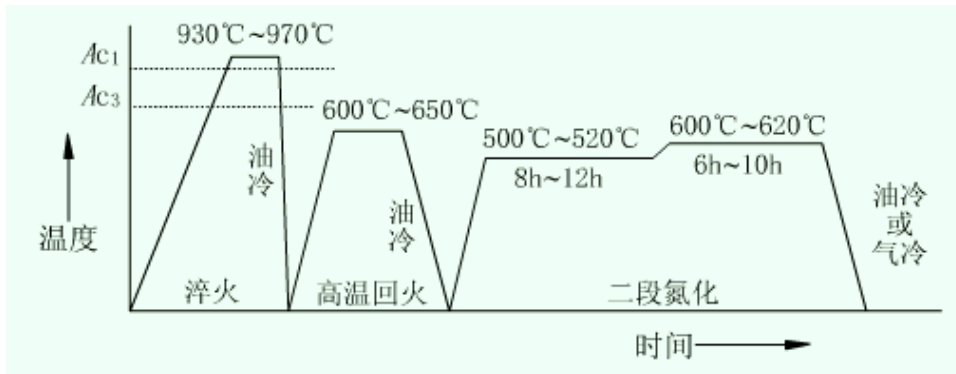
(1) 氮化温度

一般为 500 ~ 600 。氮化时间长，一般为 20 h ~ 50 h。

(2) 氮化前零件须经调质处理

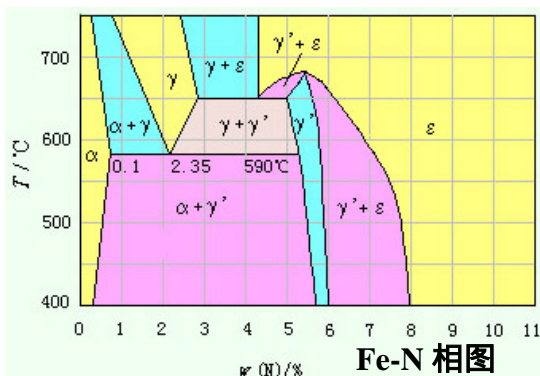
目的是改善机加工性能和获得均匀的回火索氏体组织，保证较高的强度和韧性。对于形状复杂或精度要求高的零件，在氮化前精加工后还要进行消除内应

力的退火，以减少氮化时的变形。



2. 组织和性能：

- (1) 钢件氮化后具有很高的硬度(1000 HV ~ 1100 HV), 且在 600 ~ 650 下保持不下降, 所以具有很高的耐磨性和热硬性。氮化后, 工件的最外层为一白色 ϵ 或 γ' 相的氮化物薄层, 很脆。常用精磨磨去; 中间是暗黑色含氮共析体 ($\alpha + \gamma'$) 层; 心部为原始回火索氏体组织。
- (2) 钢氮化后, 渗层体积增大, 造成表面压应力, 使疲劳强度大大提高。
- (3) 氮化温度低, 零件变形小。
- (4) 氮化后表面形成致密的化学稳定性较高的 ϵ 相层, 所以耐蚀性好, 在水中、过热蒸气和碱性溶液中均很稳定。



38CrMoAl 钢氮化层的显微组织 400 倍

四、碳氮共渗

碳氮共渗就是同时向零件表面渗入碳和氮的化学热处理工艺, 也称氰化。一般采用高温或低温两种气体碳氮共渗。低温碳氮共渗以氮为主, 实质为软氮化。

1. 高温碳氮共渗工艺

将工件放入密封炉内, 加热到共渗温度 830 ~ 850 , 向炉内滴入煤油, 同时通以氨气, 经保温 1 h ~ 2 h 后, 共渗层可达 0.2 mm ~ 0.5 mm。高温碳氮共渗主要是渗碳, 但氮的渗入使碳浓度很快提高, 从而使共渗温度降低和时间缩短。碳氮共渗后淬火, 再低温回火。

2. 碳氮共渗后的机械性能

- 共渗及淬火后, 得到的是含氮马氏体, 耐磨性比渗碳更好。
- 共渗层具有比渗碳层更高的压应力, 因而疲劳强度更高, 耐蚀性也较好。

4.4 钢的热处理新技术

为了提高零件机械性能和表面质量,节约能源,降低成本,提高经济效益,以及减少或防止环境污染等,发展了许多热处理新技术、新工艺。

一、可控气氛热处理

在炉气成分可控制的炉内进行的热处理称为可控气氛热处理。

把燃料气(天然气、城市煤气、丙烷)按一定比例空气混合后,通入发生器进行加热,或者靠自身的燃烧反应而制成的气体。也可用液体有机化合物(如甲醇、乙醇、丙酮等)滴入热处理炉内所得气氛,用于渗碳、碳氮共渗、软氮化、保护气氛淬火和退火等。

二、真空热处理

在真空中进行的热处理称为真空热处理。它包括真空淬火、真空退火、真空回火和真空化学热处理等。真空热处理具有如下优点:

(1) 可以减少变形 在真空中加热,升温速度很慢,工件变形小。

(2) 可以净化表面 在高真空中,表面的氧化物、油污发生分解,工件可得光亮的表面,提高耐磨性、疲劳强度。防止工件表面氧化。

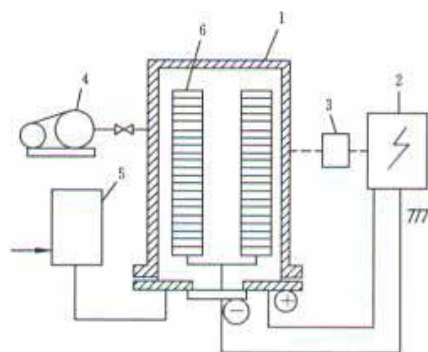
(3) 脱气作用 有利于改善钢的韧性,提高工件的使用寿命。

三、离子渗扩热处理

1. 离子氮化

离子氮化所用介质一般为氨气,压强保持在 $1.3 \times 10^2 \text{ Pa} \sim 1.3 \times 10^3 \text{ Pa}$,温度为 $500 \sim 560$,渗层为 Fe_2N 、 Fe_4N 等氮化物,具有很高的耐磨性、耐腐蚀性和耐疲劳性。

离子氮化的优点:渗速是气体渗氮的3~4倍。渗层具有一定的韧性。处理后变形小,表面银白色,质量好。能量消耗低,渗剂消耗少,对环境几乎无污染。



离子渗氮示意图

- 1-真空容器; 2-直流电源;
- 3-测温装置系统; 4-真空泵;
- 5-渗剂气体调节装置;
- 6-待处理工件

离子渗氮可用于轻载、高速条件下工作的需要耐磨耐蚀的零件及精度要求较高的细长杆类零件,如镗床主轴,精密机床丝杠、阀杆、阀门等。

2. 离子氮碳共渗+离子渗硫复合处理

先进行离子氮碳共渗,介质为氨气+丙酮蒸汽,共渗温度为 $530 \sim 580$,后再进行离子渗硫。W18Cr4V钢经复合处理后,次表层为 $\text{Fe}_{2-3}(\text{N},\text{C})$ 化合物层,表层主要由 FeS 、 Fe_3S_4 组成。由于硫化物具有自润滑性能,因此降低了摩擦系数,同

时表面硫化物的存在还提高了工件的抗咬合性能。

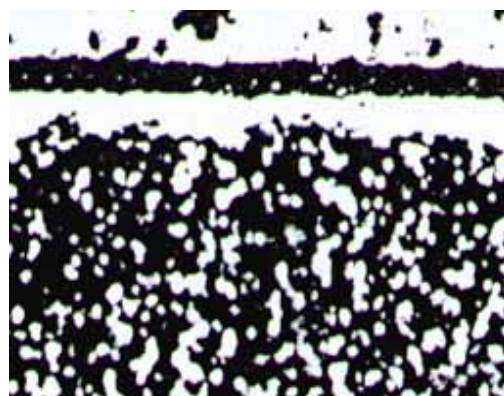
次表层高硬度的氮碳化合物具有很高的耐磨性，因此这种复合渗层抗摩耐磨性好，适于模具、刀具的表面处理，以提高它们的使用寿命。

四、 激光表面热处理

激光加热表面淬火是利用高功率密度的激光束扫描工件表面，将其迅速加热到钢的相变点以上，然后依靠零件本身的传热，来实现快速冷却淬火。

激光淬火的硬化层较浅，通常为 $0.3 \sim 0.5 \text{ mm}$ 。采用 $4 \sim 5 \text{ kW}$ 的大功率激光器，能使硬化层深度达 3 mm 。由于激光的加热速度特快，工件表层的相变是在很大过热度下进行的，因而形核率高。同时由于加热时间短，碳原子的扩散及晶粒的长大受到限制，因而得到不均匀的奥氏体细晶粒，冷却后转变成隐晶或细针状马氏体。激光淬火比常规淬火的表面硬度高 $15 \sim 20\%$ 以上，可显著提高钢的耐磨性。另外，表面淬硬层造成较大的压应力，有助于其疲劳强度的提高。

由于激光聚焦深度大，在离焦点 75 mm 范围内的能量密度基本相同，所以激光处理对工件的尺寸及表面平整度没有严格要求，能对形状复杂的零件（例如有拐角、沟槽、盲孔的零件）进行处理。激光淬火变形非常小，甚至难以检查出来，处理后的零件可直接送装配线。另外，激光加热速度极快，表面无需保护，靠自激冷却而不用淬火介质，工件表面清洁，有利于环境保护。同时工艺操作简单，也便于实现自动化。由于具有上述一系列优点，激光表面淬火二十多年来发展十分迅速，已在机械制造生产中取得了成功的应用。



W18Cr4V 钢离子氮碳共渗+离子渗硫复合处理渗层组织