

# 钢的热处理工艺

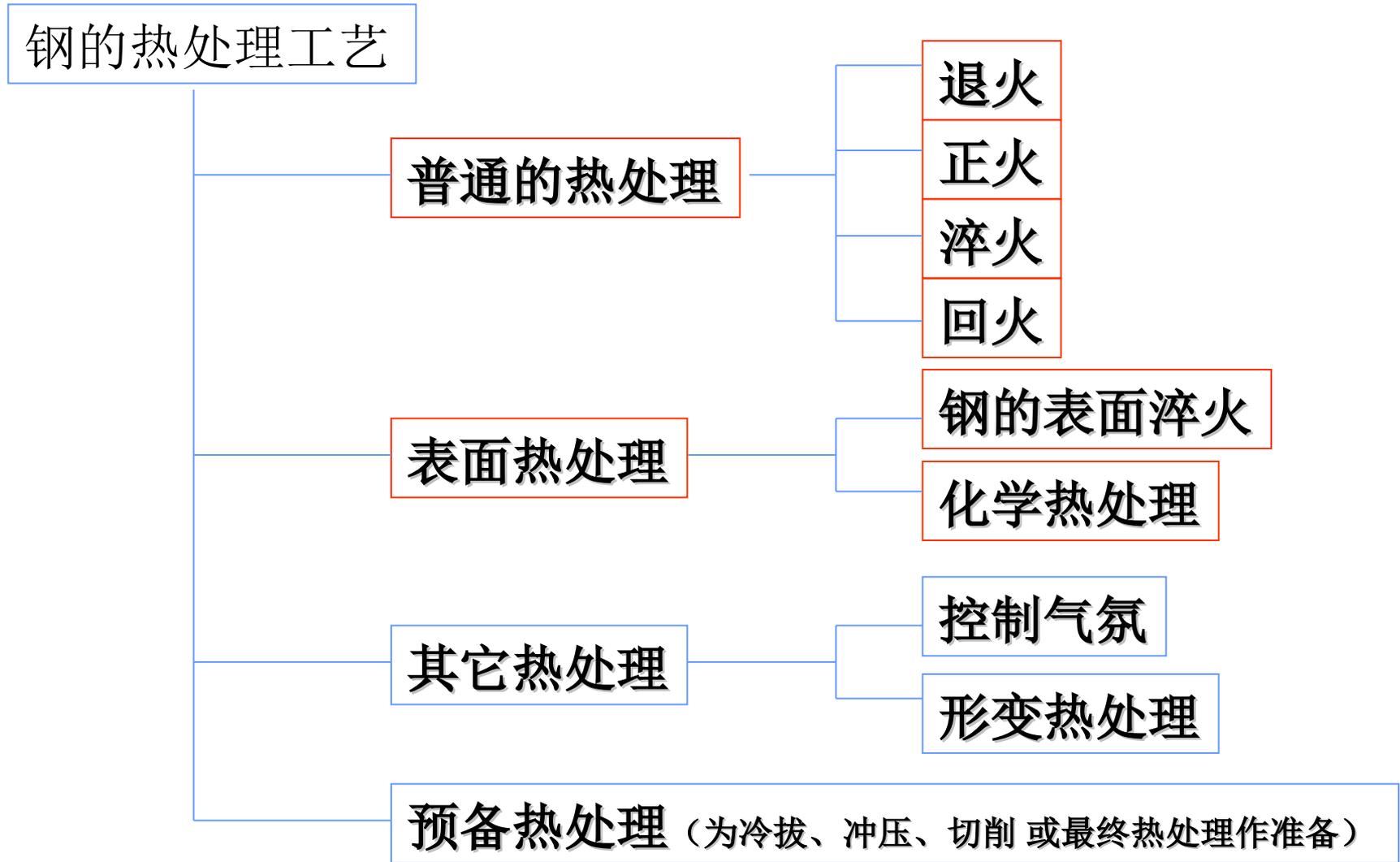
## 概述

**热处理：**将钢在固态下加热、保温、冷却，以改变钢的内部组织结构，从而获得所需要的性能的一种

工艺。（改变组织→性能）

**目的：**提高使用性能、改善工艺性能、提高产品质量、延长使用寿命、利于冷热加工，提高经济效益。

**重要性：**机床的60%—70%的零件， 汽车70%—80%的零件， 工具模具及滚动轴承100



## 本章主要内容

👉 钢的退火与正火

👉 钢的淬火与回火

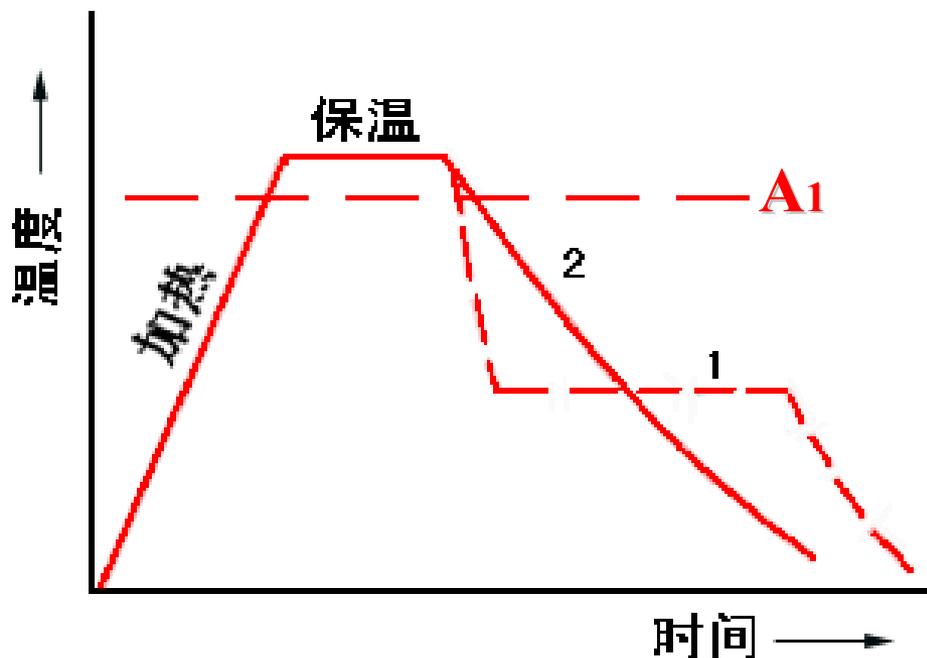
👉 钢的表面淬火

👉 钢的化学热处理

# 钢在冷却时的组织转变

## 1、钢的冷却方式

热处理时常用的冷却方式有两种：一是等温冷却（常用于理论研究）；二是连续冷却（常用于生产）。



两种冷却方式示意图

## 2、过冷奥氏体的转变产物及其过程

组织名称		符号	转变温度 /°C	相组成	转变类型	特    征
珠 光 体	珠光体	P	A1~650	F+Fe <sub>3</sub> C	扩散型 (Fe 和C均扩散)	片层间距: 0.25~1.9μm, 500×
	索氏体	S	650~600			间距: 0.25~0.08μm, 1000×
	屈氏体	T	600~550			间距: 0.03~0.08μm, 2000×
贝 氏 体	上贝氏体	B <sub>上</sub>	550~350	F <sub>饱和</sub> + Fe <sub>3</sub> C	半扩散型 (只有C扩 散)	羽毛状: 在平行密排的过饱和F板条间, 不均匀分布短杆(片状) Fe <sub>3</sub> C,脆性大, 工业上不应用
	下贝氏体	B <sub>下</sub>	350~240	F <sub>饱和</sub> + Fe <sub>2.4</sub> C		板状: 低碳钢中, F和 Fe <sub>2.4</sub> C的复 相组织。                    片状: 高碳 钢中, 复相组织。
马 氏 体	片(针) 状马氏体	M	240~-50	C在α-Fe 中的过饱 和固溶体 (bcc)	非扩散型 (Fe和C均 不扩散)	①马氏体变温形成, 与t <sub>保</sub> 无关; ②马氏体转变不完全性, 钢 中常存在残余A(性能下降), 常要求淬火T接近M <sub>f</sub> “冷处理”. ③马氏体性能与含碳量有关
	板状马 氏体					

注:  $w(c) \geq 1.0\%$ 时形成片状马氏体, HRC: 64~66;

$w(c) \leq 0.2\%$ 时形成板状马氏体, HRC: 30~50。

# 退火

**退火**是将钢加热至临界点Ac1以上或以下温度，保温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。

**主要目的**是均匀钢的化学成分及组织，细化晶粒，调整硬度，消除内应力和加工硬化，改善钢的成形及切削加工性能，并为淬火作好组织准备。

退火工艺种类很多，根据加热温度可分为在临界温度( $A_{c1}$ 或 $A_{c3}$ )以上或以下的退火。前者包括完全退火、均匀化退火、不完全退火和球化退火；后者包括再结晶退火及去应力退火。

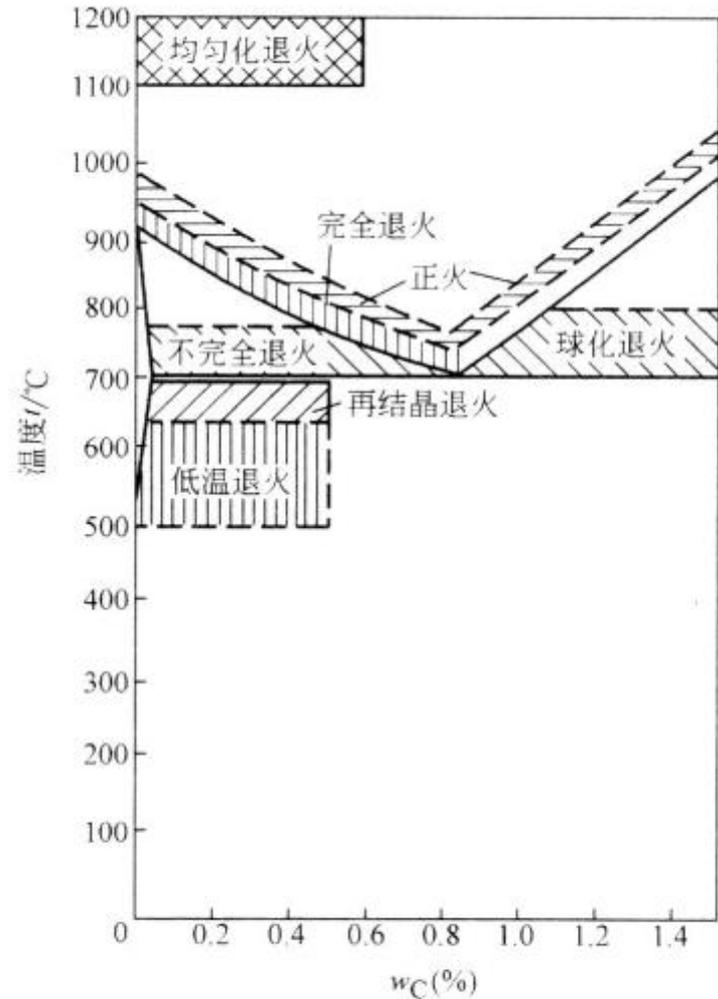


图 10-1 退火、正火加热温度示意图

## (一)完全退火

完全退火是将钢件或钢材加热至 $A_{c3}$ 以上 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，保温足够长时间，使组织完全奥氏体化后缓慢冷却，以获得近于平衡组织的热处理工艺。

主要用于亚共析钢( $w_{\text{C}}=0.3\%\sim 0.6\%$ )，其目的是细化晶粒，均匀组织，消除内应力，降低硬度和改善钢的切削加工性。

低碳钢和过共析钢不宜采用完全退火、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 $A_{\text{ccm}}$ 以上奥氏体状态缓冷退火时，有网状二次渗碳体析出，使钢的强度、塑性和冲击韧度显著降低。

完全退火采用随炉缓冷可以保证先共析铁素体的析出和过冷奥氏体在 $A_{r1}$ 以下较高温度范围内转变为珠光体，从而达到消除内应力，降低硬度和改善切削加工性能的目的。工件在退火温度下的保温时间不仅要使工件烧透，即工件心部达到要求的加热温度，而且要保证全部得到均匀化的奥氏体。

完全退火需要的时间很长，尤其是过冷奥氏体比较稳定的合金钢更是如此。如果将奥氏体化后的钢较快地冷至稍低于 $A_{r1}$ 温度等温，使奥氏体转变为珠光体，再空冷至室温，则可大大缩短退火时间，这种退火方法叫做**等温退火**。等温退火适用于高碳钢、合金工具钢和高合金钢，它不但可以达到和完全退火相同的目的，而且有利于钢件获得均匀的组织 and 性能。

## (二)不完全退火

不完全退火是将钢加热至 $A_{c1} \sim A_{c3}$ ，(亚共析钢)或 $A_{c1} \sim A_{ccm}$  (过共析钢)之间，经保温后缓慢冷却以获得近于平衡组织的热处理工艺。

由于加热至两相区温度，基本上不改变先共析铁素体或渗碳体的形态及分布。如果亚共析钢原始组织中的铁素体已均匀细小，只是珠光体片间距小，硬度偏高，内应力较大，那么只要进行不完全退火即可达到降低硬度、消除内应力的目的。

对于亚共析钢的锻件来说，若其锻造工艺正常，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。

不完全退火用于过共析钢主要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，故又称球化退火。实际上球化退火是不完全退火的一种。

### (三)球化退火

**球化退火**是使钢中碳化物球化，获得粒状珠光体的一种热处理工艺。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，均匀组织，改善切削加工性，并为淬火作组织准备。

过共析钢锻件锻后组织一般为片状珠光体，如果锻后冷却不当，还存在网状渗碳体。不仅硬度高、难于切削加工，而且增大钢的脆性，淬火时容易产生变形或开裂。

因此，锻后必须进行球化退火，获得粒状珠光体：球化退火的关键在于奥氏体中要保留大量未溶碳化物质点，并造成奥氏体碳浓度分布的不均匀性：为此，球化退火加热温度一般在 $A_{c1}$ 以上 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 不高的温度下，保温时间亦不能太长，一般以 $2\sim 4\text{h}$ 为宜。冷却方式通常采用炉冷。或在 $A_{r1}$ 以下 $20^{\circ}\text{C}$ 左右进行较长时间等温。

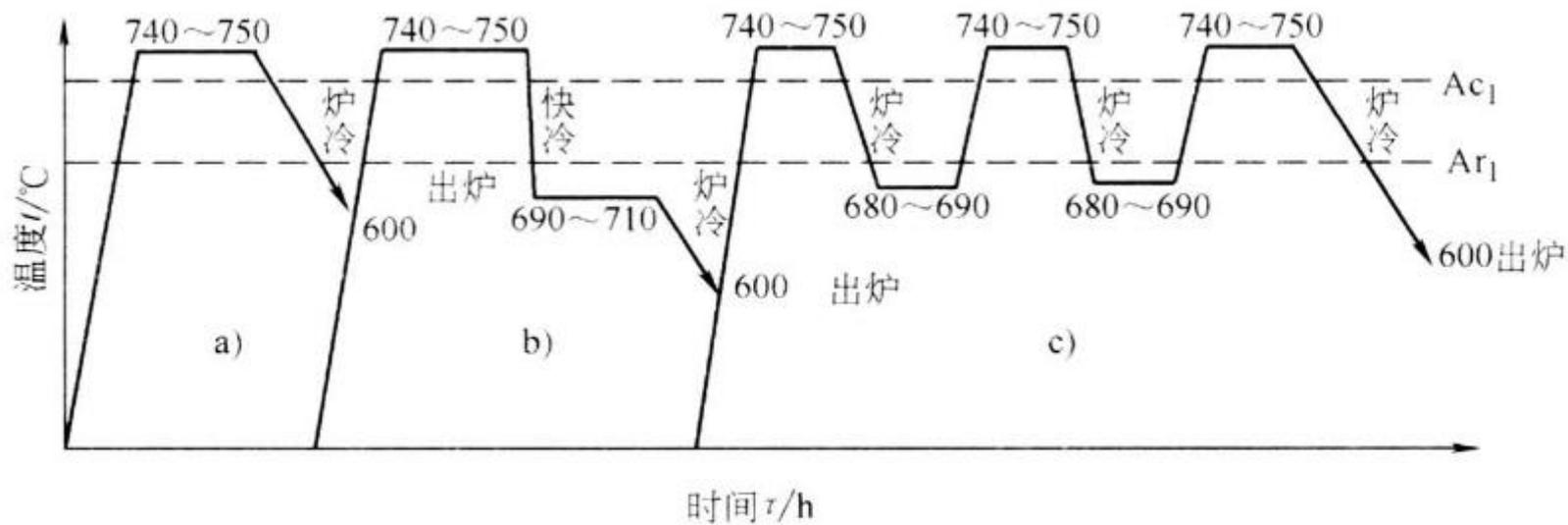


图 10-2 碳素工具钢 (T7 ~ T10) 的几种球化退火工艺

#### (四)均匀化退火

**均匀化退火**又称扩散退火，它是将钢锭、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。

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。

为使各元素在奥氏体中充分扩散，均匀化退火加热温度很高，通常为 $A_{c3}$ 或 $A_{ccm}$ 以上 $150\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

具体加热温度视偏析程度和钢种而定。碳钢一般为 $1100\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，合金钢多采用 $1200\sim 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。保温时间也与偏析程度和钢种有关，通常可按最大有效截面或装炉量大小而定。一般均匀化退火时间为 $10\sim 15\text{h}$ 。

由于均匀化退火需要在高温下长时间加热，因此奥氏体晶粒十分粗大，需要再进行一次完全退火或正火，以细化晶粒、消除过热缺陷。

## (五)去应力退火和再结晶退火

为了消除铸件、锻件、焊接件及机械加工工件中的残留内应力，以提高尺寸稳定性，防止工件变形和开裂，在精加工或淬火之前将工件加热到 $A_{c1}$ 以下某一温度，保温一定时间，然后缓慢冷却的热处理工艺称为**去应力退火**。

钢的去应力退火加热温度较宽，但不超过 $A_{c1}$ 点，一般在 $500\sim 650^{\circ}\text{C}$ 之间。铸铁件去应力退火温度一般为 $500\sim 550^{\circ}\text{C}$ ，超过 $550^{\circ}\text{C}$ 容易造成珠光体的石墨化。焊接钢件的退火温度一般为 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ 。

**再结晶退火**是把冷变形后的金属加热到**再结晶温度**以上保持适当的时间，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的热处理工艺。经过再结晶退火，钢的组织 and 性能恢复到冷变形前的状态。

再结晶退火既可作为钢材或其他合金多道冷变形之间的中间退火，也可作为冷变形钢材或其他合金成品的最终热处理。

一般钢材再结晶退火温度为 $650\sim 700^{\circ}\text{C}$ ，保温时间为 $1\sim 3\text{h}$ ，通常在空气中冷却。

# 退火

**第一类退火**（扩散退火、再结晶退火、去应力退火）是不以组织转变为目的的工艺方法，由不平衡状态过渡到平衡状态。

**第二类退火**（完全退火、不完全退火、等温退火、球化退火）是以改变组织和性能为目的，改变钢中珠光体、铁素体和碳化物等组织形态及分布。

名称	目的	工艺制度	组织	应用
完全退火	细化晶粒，消除铸造偏析，降低硬度，提高塑性	加热到 $A_{C3} + 20 \sim 50^\circ\text{C}$ ，炉冷至 $550^\circ\text{C}$ 左右空冷	F+P	亚共析钢的铸、锻、轧件，焊接件
球化退火	降低硬度，改善切削性能，提高塑性韧性，为淬火作组织准备	加热到 $A_{C1} + 20 \sim 40^\circ\text{C}$ ，然后缓冷	片状珠光体和网状渗碳体组织转变为球状	共析、过共析钢及合金钢的锻件、轧件等
扩散退火	改善或消除枝晶偏析，使成分均匀化	加热到 $T_m - 100 \sim 200^\circ\text{C}$ ，先缓冷，后空冷	粗大组织（组织严重过烧）	合金钢铸锭及大型铸钢件或铸件
再结晶退火	消除加工硬化，提高塑性	加热到再结晶温度，再空冷	变形晶粒变成细小的等轴晶	冷变形加工的制品
去应力退火	消除残余应力，提高尺寸稳定性	加热到 $500 \sim 650^\circ\text{C}$ 缓冷至 $200^\circ\text{C}$ 空冷	无变化	铸、锻、焊、冷压件及机加工件

常用退火工艺制度小结

# 正火

**正火**是将钢加热到 $A_{c3}$ (或 $A_{ccm}$ )以上适当温度，保温以后在空气中冷却得到珠光体类组织的热处理工艺。

对于亚共析钢来说，正火与完全退火的加热温度相近，但正火的冷却速度较快，转变温度较低，正火组织中铁素体数量较少，珠光体组织较细，钢的强度、硬度较高。

正火过程的实质是完全奥氏体化加伪共析转变。当钢中碳含量为0.6%~1.4%时，正火组织中不出现先共析相，只有伪共析体或索氏体。碳含量小于0.6%的钢，正火后除了伪共析体外，还有少量铁素体。

正火处理的加热温度通常在 $A_{c3}$ 或 $A_{ccm}$ 以上 $30\sim 50$ ℃，高于一般退火的温度。对于含有V、Ti、Nb等碳化物形成元素的合金钢，可采用更高的加热温度，即为 $A_{c3}+100\sim 150$ ℃。

**正火保温时间**和完全退火相同，应以工件透烧，即心部达到要求的加热温度为准，还应考虑钢材成分、原始组织、装炉量和加热设备等因素。通常根据具体工件尺寸和经验数据加以确定。

**正火冷却方式**最常用的是将钢件从加热炉中取出在空气中自然冷却。对于大件也可采用吹风、喷雾和调节钢件堆放距离等方法控制钢件的冷却速度，达到要求的组织和性能。

**与退火区别：**冷却速度比退火稍快，组织较细，强度硬度稍有提高。

**目的：**

- 1.预备热处理、降低硬度、提高切削性能。
- 2.消除过共析钢的网状二次渗碳体，为球化退火作组织准备。
- 3.普通结构零件的最终热处理

**应用：**一般作为预备热处理，也可作大型或形状复杂零件的终热处理。

低碳钢：正火

中碳钢：退火（正火）

高碳钢：正火+球化退火

## 退火和正火的选用

$\omega_{\text{C}}=0.25\% \sim 0.5\%$ 的中碳钢也可用正火代替退火，虽然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，而且正火成本低，生产率高。

$\omega_{\text{C}}=0.5\% \sim 0.75\%$ 的钢，因含碳量较高，正火后的硬度显著高于退火的情况，难以进行切削加工，故一般采用完全退火，降低硬度，改善切削加工性。

$\omega_{\text{C}}=0.75\%$ 以上的高碳钢或工具钢一般均采用球化退火作为预备热处理。如有网状二次渗碳体存在，则应先进行正火消除之。

# 淬火

将钢加热到临界温度以上，保温后以大于 $V_k$ 的速度冷却，使奥氏体转变为马氏体的热处理工艺。

## 目的

:

经过退火或正火的工件只能获得一般的强度和硬度，对于许多需要高强度、高耐磨条件下工作的零件则必须淬火与回火处理。

## 3.1 钢在淬火时的组织和性能变化

### 1 获得马氏体的条件

- (a) 通过加热使钢具有奥氏体组织；
- (b) 冷却速度超过临界冷却速度；
- (c) 在 $M_s \sim M_f$ 温度范围使过冷奥氏体发生马氏体转变。

## 3.2 钢的淬火工艺

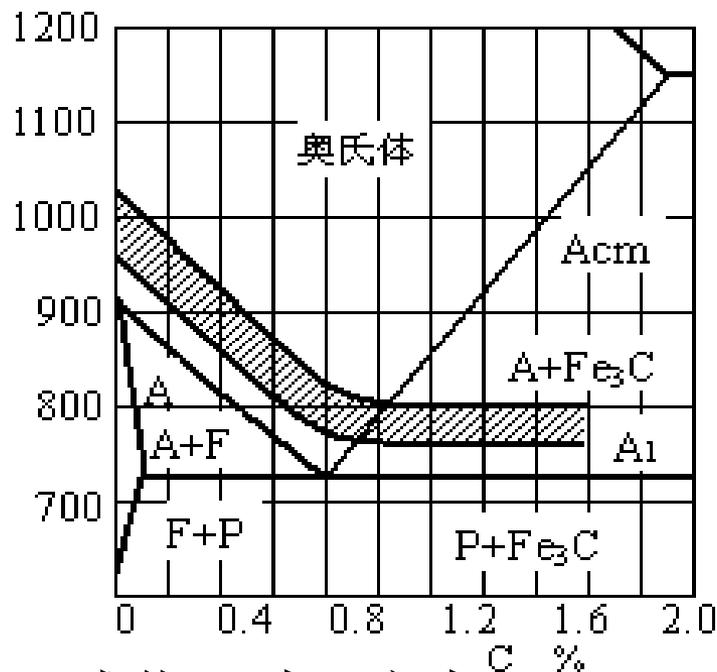
### 1 淬火加热温度

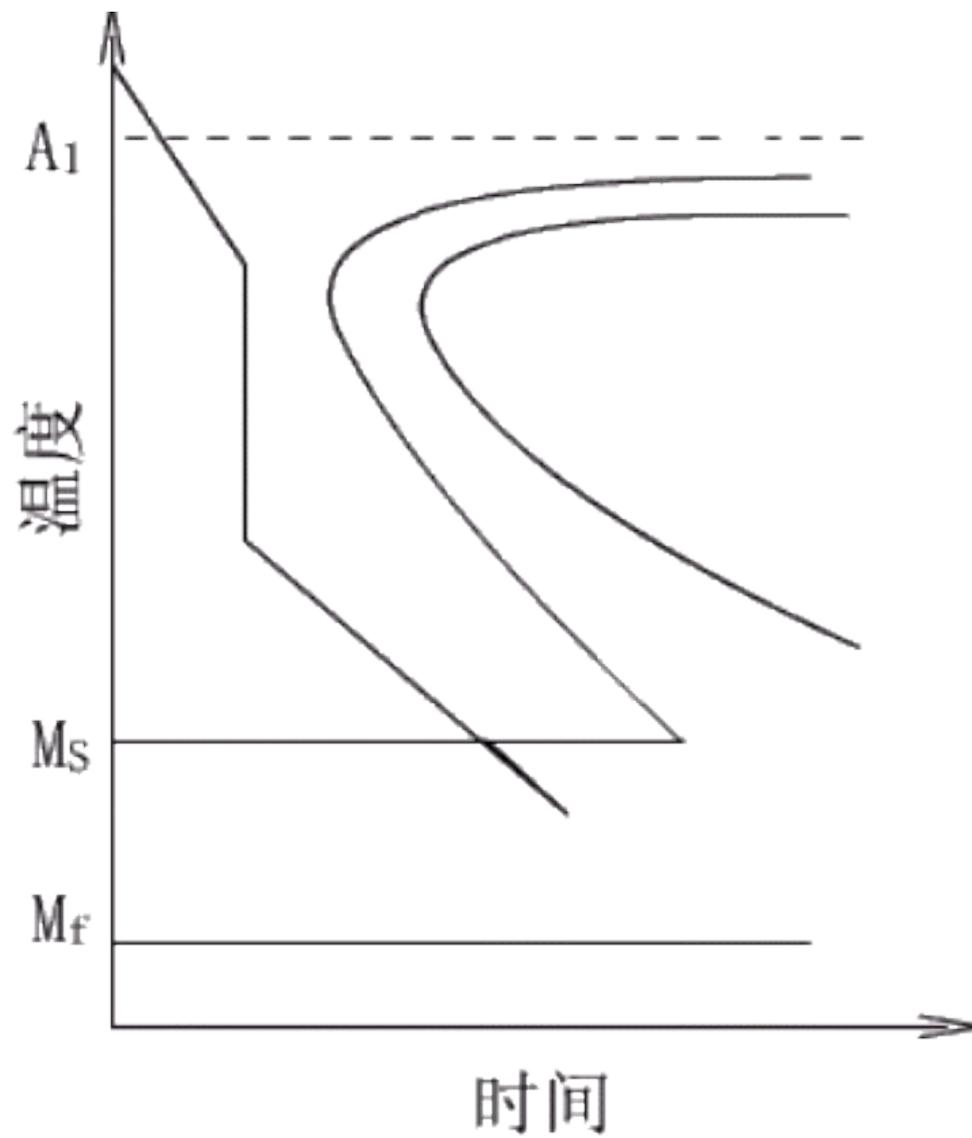
**原则：**细小的均匀的奥氏体

**亚共析钢：**  $Ac_3+30-50\text{ }^\circ\text{C}$

**过共析钢：**  $Ac_1+30-50\text{ }^\circ\text{C}$ ，正火+球化退火+淬火

**合金钢：**  $Ac_1+50-100\text{ }^\circ\text{C}$ （合金元素阻碍奥氏体化）





理想淬火冷却温度

## 2 淬火保温时间

淬火保温时间主要根据钢的成分特点、加热介质和零件尺寸来确定。

(a) 含碳量越高，含合金元素越多，导热性越差，则保温时间就越长；

(b) 零件尺寸越大，保温时间越长

(c) 生产中常根据经验确定保温时间

### 3 淬火冷却速度

#### 淬火冷却介质选择的原则:

(a) 为保证获得马氏体组织, 要求 $V_{\text{冷却}} \geq V_{\text{临界}}$ ;

(b) 为保证零件不因淬火应力而开裂, 要求 $V_{\text{冷却}}$ 不应太大, 应该选择合适的冷却介质。

水: 主要用于形状简单、截面较大的碳钢零件的淬火。

油: 一般用作合金钢和某些小型复杂碳素钢件的淬火。

盐浴: 为了减少零件淬火时的变形, 盐浴也常用作淬火介质, 主要用于分级淬火和等温淬火。

## 常用的淬火冷却介质

名 称	最大冷却速度时		平均冷却速度/( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ )	
	所在温 度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却速度 ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ )	650~550 $^{\circ}\text{C}$	300~200 $^{\circ}\text{C}$
20 $^{\circ}\text{C}$ 静止水	340	775	135	450
40 $^{\circ}\text{C}$ 静止水	285	545	110	410
60 $^{\circ}\text{C}$ 静止水	220	275	80	185
10%NaCl 溶液	580	2000	1900	1000
10%NaOH 溶液	560	2830	2750	775
20 $^{\circ}\text{C}$ 10号机油	430	230	60	65
80 $^{\circ}\text{C}$ 10号机油	430	230	70	55
20 $^{\circ}\text{C}$ 3号锭子油	500	120	100	50

### 3 淬火方法

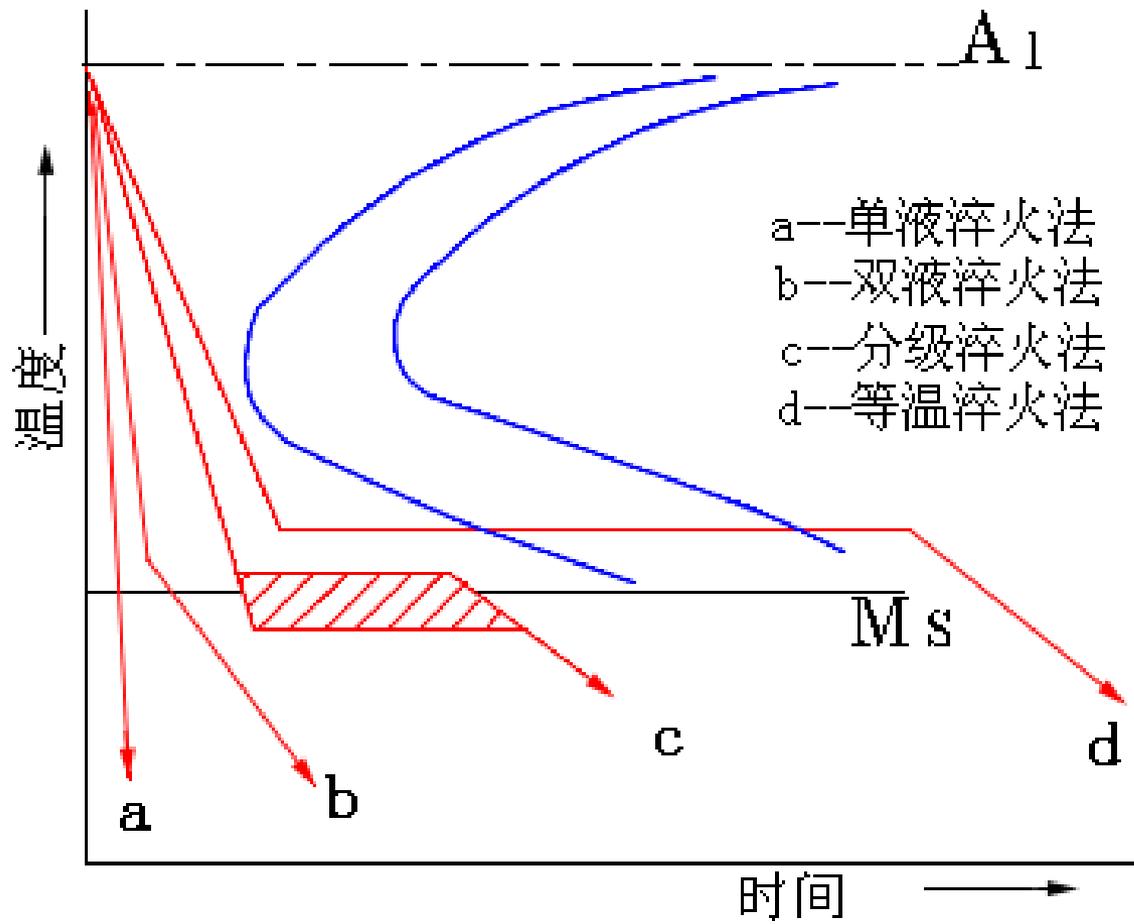
a. 简单淬火法：水，油

b. 双液淬火法：水淬油冷或油淬空冷。难以控制。用于形状复杂的高碳钢件和大型合金钢件。

c. 分级淬火法：将工件在 $M_S$ 附近盐浴或碱浴中淬火，待工件内外温度均匀后，再取出空冷的方法。减少变形与开裂。

d. 等温淬火法：将工件在略高于 $M_S$ 的盐浴或碱浴中冷却并保温足够的时间，从而获得下贝氏体组织的淬火方法。

综合性能高。用于形状复杂和要求较高的小零件。



各种淬火方法的示意图

### 3.3 钢的淬透性和淬硬性

**钢的淬透性**是指钢在淬火时获得马氏体的能力。其大小通常用规定条件下淬火获得淬透层的深度（又称有效淬硬深度）的距离作为**淬透层深度**。

生产中也常用临界淬火直径表示钢的淬透性。所谓**临界淬火直径**，是指圆棒试样在某介质中淬火时所能得到的最大淬透直径。

**钢的淬硬性**是指淬火后马氏体所能达到的最高硬度，淬硬性主要决定于马氏体的碳含量。

### **淬透性的应用：**

- (1) 淬透性大的工件易淬透，组织和性能均匀一致；
- (2) 淬硬性大的工件在淬火时，可选用冷却能力较小的淬火介质以减小淬火应力。
- (3) 对受力大而复杂的工件，为确保组织性能均匀一致，可选用淬透性大的钢。
- (4) 当要求工件表面硬度高，而心部韧性好时，可选用低淬透性钢。

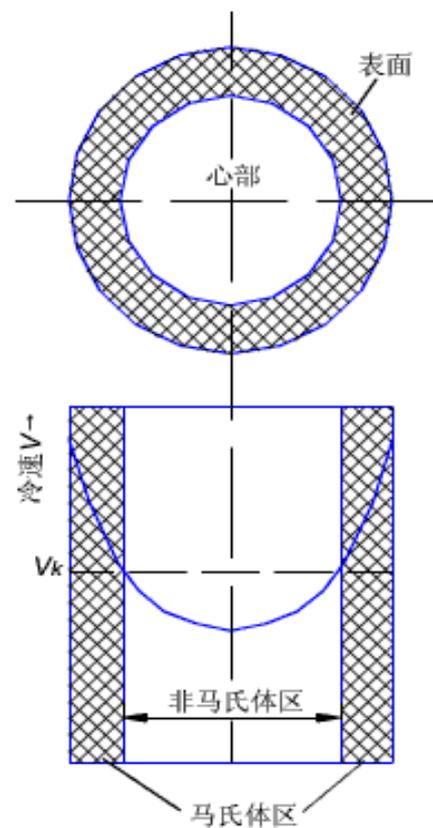
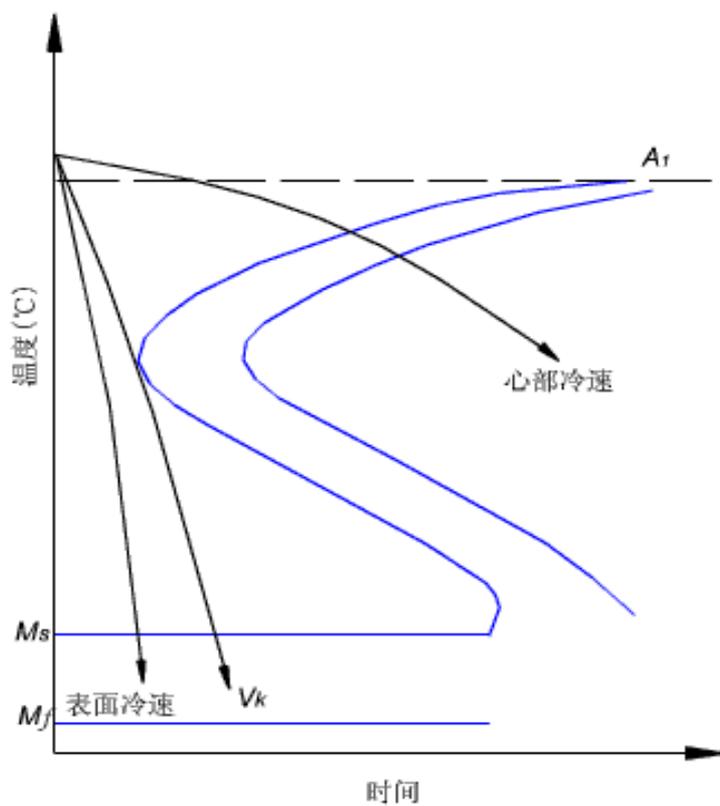
## 影响淬透性的因素

1. 化学成分： $C\uparrow$ 、C曲线右移， $V_k$ 减小，淬透性好。

共析钢淬透性最高。合金 $\uparrow$ ，淬透性高。

2. 奥氏体化条件： $T$ 、 $t\uparrow$ 晶粒越大、成分越均匀、过冷奥氏体越稳定、C曲线越右移、 $V_k$ 越小、淬透性越好。

## 工件淬硬层与冷却速度的关系



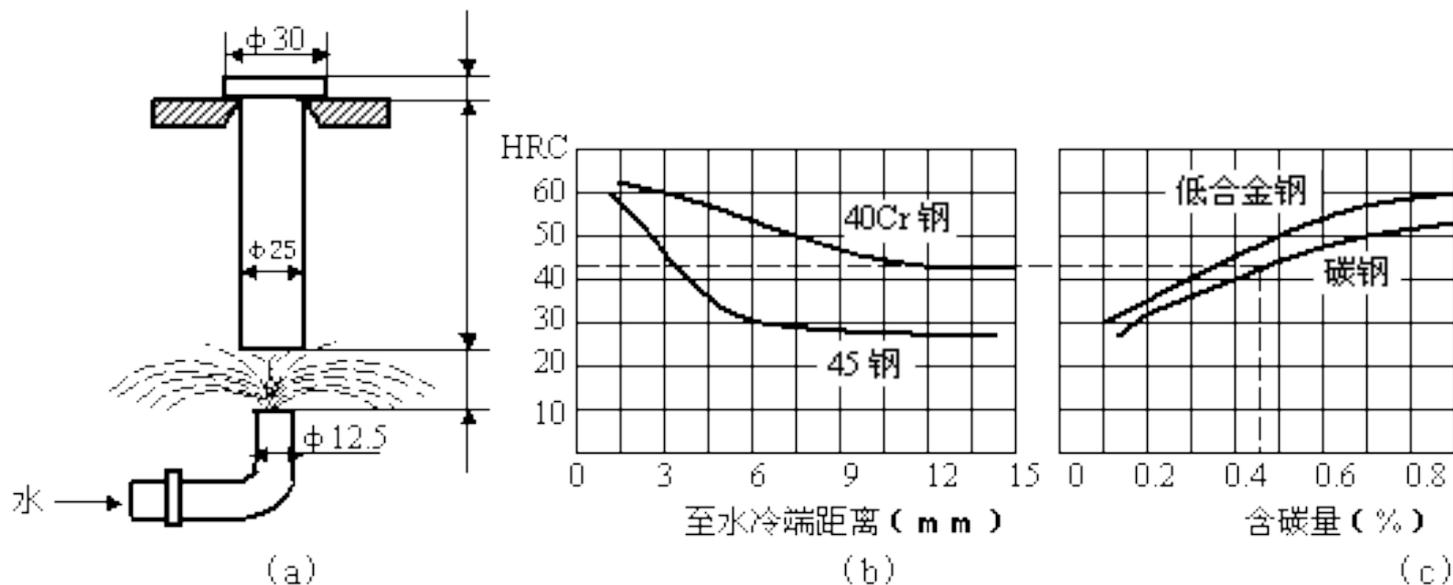
# 淬透性的测定及表示方法

## 1、淬透性的表示方法

A. 用淬透性曲线表示  $J(HCR/d)$ 。

B. 用临界淬透直径表示： $D_0 \gg J(HCR/d)$ ，圆棒试样在某介质中淬火时，截面中心被淬成半马氏体的最大直径  $D_0$ 。

2、测定方法：末端测定法： $\phi 25 \times 100\text{mm}$ 试样，奥氏体化一端喷水冷却，打磨0.2-0.5mm，间隔1.5mm测硬度值，画出硬度分布曲线（淬透性曲线），根据半马氏体硬度与钢的含碳量的关系，求出半马氏体区的长度。



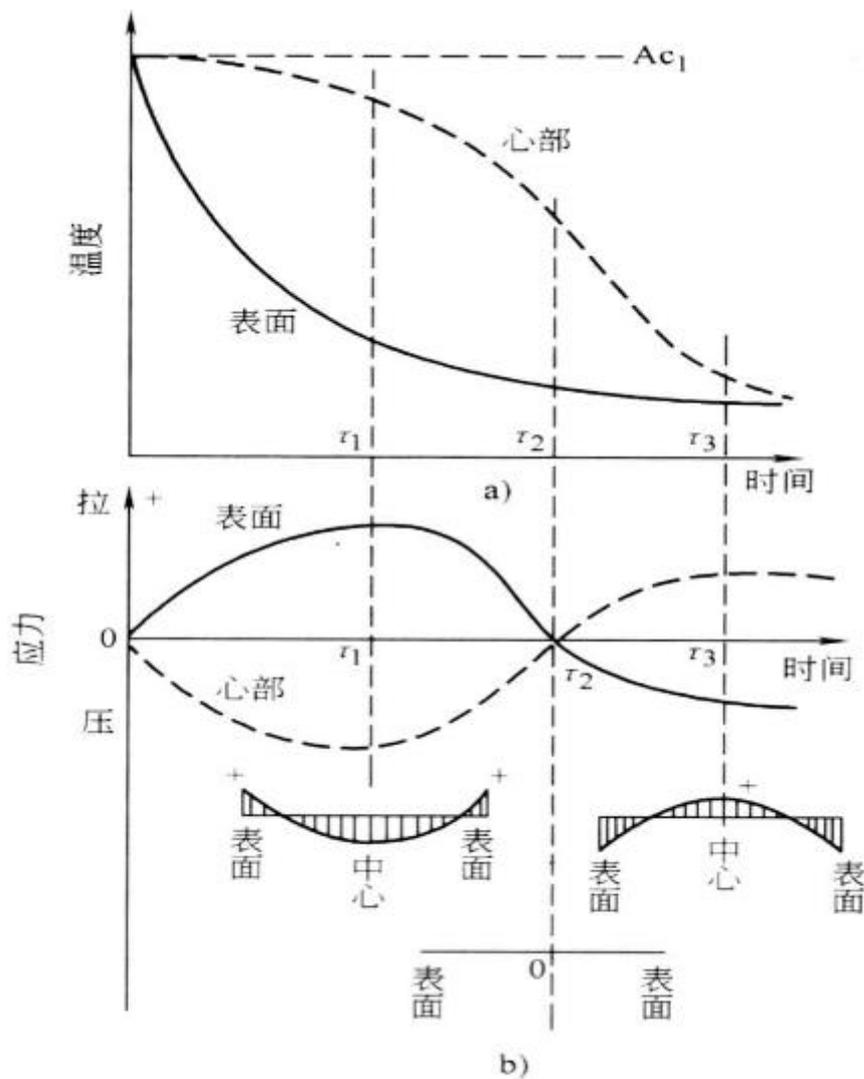
末端淬火试验测定淬透性曲线

## 淬火应力

淬火内应力主要有热应力和组织应力两种。工件最终变形或开裂是这两种应力综合作用之结果。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抗拉强度时，工件则发生开裂。

工件加热或冷却时由于内外温差导致热胀冷缩不一致而产生的内应力叫做**热应力**。

在冷却过程中，由于内外温差造成组织转变不同时，引起内外比体积的不同变化而产生的内应力叫做**组织内应力**

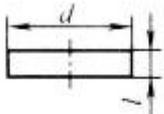
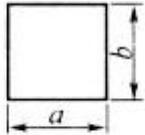
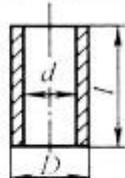
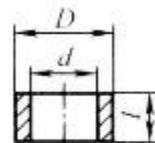
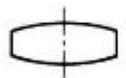
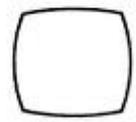
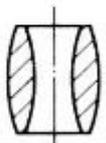
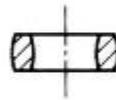
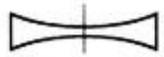
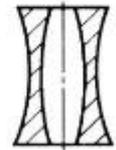
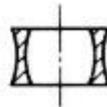


圆柱形零件心部和表面温度及热应力变化

钢中各种组织的比体积是不同的，从奥氏体、珠光体、贝氏体到马氏体，比体积逐渐增大，因此，钢淬火时由奥氏体转变为马氏体将造成显著的体积膨胀。

不同条件下热应力和组织应力的大小和分布也不相同。只有搞清具体条件下起主导作用的是热应力还是组织应力，才能有针对性地采取措施减小之，从而达到控制零件变形和防止零件开裂的目的。

表 10-1 各种典型钢件的淬火变形规律

	杆 件	扁 平 件	四 方 体	套 筒	圆 环
初始状态					
热应力作用					
组织应力作用					

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/007150113061010003>