

## 总结

**金属的机械性能：**刚度；强度；塑性；硬度冲击韧性；疲劳强度

**刚度：**抵抗弹性形变的能力；取决于材料本身；弹性模量  $E$

**强度：**抵抗产生塑性变形和断裂的能力；屈服强度，拉伸强度

屈强比：屈服强度/拉伸强度  $\geq 0.8$

**塑性：**产生塑性变形而不破坏的能力

延伸率：

断面收缩率：

**硬度：**抵抗局部塑性变形的能力；精度较高，压痕大

**布氏硬度 (HB)：**单位面积压痕上的力  $HB=P/F$

$HB < 450$ , 淬火钢球压头, HBS; 硬度  $\geq 450$ , 硬质合金球压头, HBW

**洛氏硬度 (HRA, HRB, HRC)：**压痕深度；压痕小材料范围广，不测量硬脆薄层

**维氏硬度 (HV)：**单位压痕面积上力；压痕浅，操作麻烦

**冲击韧性 ( )：**动载荷作用下性能指标；

材料脆性转变温度越低，材料的低温冲击性越好。

**疲劳强度：**交变载荷

**高温下的机械性能指标：**高温强度（热强度）

蠕变极限：长期高温和应力作用下抵抗塑性变形的能力

例： $\sigma = 57\text{MPa}$ ，即其在  $500^\circ\text{C}$  下工作 10000h，产生 0.1% 的变形量时最大应力为 57MPa

持久长度：长期高温和应力作用下抵抗断裂的能力

例： $\sigma = 190\text{MPa}$ ，即其在  $500^\circ\text{C}$  下工作 100000h，产生断裂的应力为 190MPa

硬性：高温下仍具有较高硬度

**工艺性能：**铸造性；可锻性；可焊性；热处理性；切削加工性

**铸造性：**锻造方法获得完好铸件能力

流动性，收缩率，偏析（化学成分不均匀）

可锻性：承受压力加工（锻造）的能力；取决于塑性和变形抗力

可焊性：焊接时，获得优质焊缝的能力

低碳钢和低合金高强度钢具有良好可焊性；高碳钢差；灰铸铁不能

**物化性：**

**物理：**密度 熔点 热膨胀性 导电性 导热性 磁性 耐磨性

**化学：**耐腐蚀性 抗氧化性

**金属的特性：**优良的导电和导热性；正的电阻温度系数；良好的塑性；有金属光泽，但不透明

**常见纯金属的晶格类型：**体心立方(bcc)、面心立方(fcc)和密排六方(hcp)晶格

体心立方：晶格常数： $a(a=b=c)$ ；原子半径： $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$ ；原子个数：2；配位数：8；致密度：0.68

面心立方：晶格常数： $a$ ；原子半径： $r = \frac{\sqrt{2}}{4}a$ ；原子个数：4；配位数：12；致密度：0.74

$$r = \frac{1}{2}a$$

密排六方：晶格常数：底面边长  $a$  和高  $c$ ， $c/a=1.633$ ；原子半径：；原子个数：6；

配位数：12；致密度：0.74

### 实际金属中的晶体缺陷：点、线、面缺陷

点缺陷：空位；间隙原子；置换原子

晶格畸变：强度、硬度提高，塑性、韧性下降

线缺陷：晶体中的位错：刃型位错；螺型位错

金属的塑性变形主要由位错运动引起，因此阻碍位错运动是强化金属的主要途径。

面缺陷：晶界；亚晶界

晶界的特点：原子排列不规则；熔点低；耐蚀性差；易产生内吸附，外来原子易在晶界偏聚；

阻碍位错运动，是强化部位，因而实际使用的金属力求获得细晶粒；是相变的优先形核部位。

**同素异构转变的意义：**由于同素异构现象，使金属在不同温度下具有不同的性能；由于不同的晶体结构，致密度不同，在同素异构转变时，有体积的变化；钢、铸铁的成份绝大部分是铁，所以钢、铸铁也会发生同素异构转变。

**晶粒度：**晶粒大小叫晶粒度，用单位面积上的晶粒数目或晶粒的平均线长度（或直径）表示。

金属的晶粒越细，其强度和硬度越高；晶粒越细，晶界总面积越大，位错障碍越多；需要协调的具有不同位向的晶粒越多，使金属塑性变形的抗力越高。

金属的晶粒越细，其塑性和韧性也越高；因为晶粒越细，单位体积内晶粒数目越多，参与变形的晶粒数目也越多，变形越均匀，使在断裂前发生较大的塑性变形；强度和塑性同时增加，金属在断裂前消耗的功也大，因而其韧性也比较好。

**控制晶粒度的方法：**过冷度的影响；变质处理（孕育）；增强金属液的运动

过冷度的影响：降低浇注温度；减小铸型温度升高速度；提高冷却速度

变质处理（孕育）：加入一定量的难熔固体

增强金属液的运动：机械振动、超声波振动、电磁搅拌等

**铸锭组织结构与特点：**表面细等轴晶区；柱状晶区；中心等轴晶区

**铸锭缺陷：**结晶组织；化学成分；物理

结晶组织：粗细不均→各处机械性能不均

化学：微观偏析（枝晶偏析等）和宏观偏析（区域偏析和比重偏析等）→各处机械性能不均

物理：各种缩孔和气孔，降低组织致密度→各处机械性能不均

**焊缝组织：**结晶特征；热影响区特征

结晶特征：动态结晶，易呈单一柱晶

热影响区特征：存在温度分布，经历固态相变过程，靠近焊缝的过热段晶粒粗大，性能很差

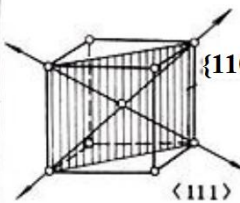
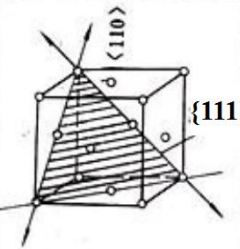
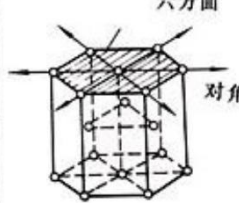
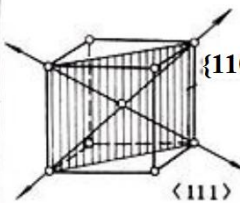
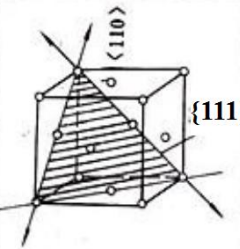
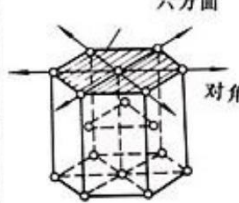
### 塑性变形的形式：滑移；孪生

滑移：晶体的一部分沿一定的晶面和晶向相对于另一部分发生滑动位移的现象

滑移只能在切应力的作用下发生。临界切应力：产生滑移的最小切应力；

沿晶体中原子密度最大的晶面和晶向发生

滑移系越多，金属发生滑移的可能性越大，塑性也越好，其中滑移方向对塑性的贡献比滑移面更大；

晶格	体心立方晶格		面心立方晶格		密排六方晶格	
滑移面	$\{110\}$ $\times 6$		$\{111\}$ $\times 4$		六方底面 $\times 1$	
滑移方向	$\langle 111 \rangle$ $\times 2$		$\langle 110 \rangle$ $\times 3$		底面对角线 $\times 3$	
滑移系	$6 \times 2 = 12$		$4 \times 3 = 12$		$1 \times 3 = 3$	

滑移时，晶体两部分的相对位移量是原子间距的整数倍，滑移的结果在晶体表面形成台阶，称滑移线，若干条滑移线组成一个滑移带；

滑移的同时伴随着晶体的转动。

滑移的机理：滑移是通过滑移面上位错的运动来实现的

孪生：晶体的一部分沿一定晶面和晶向相对于另一部分所发生的切变

发生切变的部分称孪生带或孪晶，沿其发生孪生的晶面称孪生面。

孪生的结果使孪生面两侧的晶体呈镜面对称。

与滑移相比：孪生使晶格位向发生改变；所需切应力比滑移大得多，变形速度极快，接近声速；孪生时相邻原子面的相对位移量小于一个原子间距。

密排六方晶格金属滑移系少，常以孪生方式变形。体心立方晶格金属只有在低温或冲击作用下才发生孪生变形。面心立方晶格金属，一般不发生孪生变形，但常发现有孪晶存在，这是由于相变过程中原子重新排列时发生错排而产生的，称退火孪晶。

## 多晶体金属的塑性变形

**多晶体金属塑性变形影响因素：**晶界；晶粒位向；晶粒大小

晶界的影响：当位错运动到晶界附近时，受到晶界的阻碍而堆积起来，称位错的塞积。要使变形继续进行，则必须增加外力，从而使金属的变形抗力提高。

晶粒位向的影响：由于各相邻晶粒位向不同，当一个晶粒发生塑性变形时，为了保持金属的连续性，周围的晶粒若不发生塑性变形，则必以弹性变形来与之协调。这种弹性变形便成为塑性变形晶粒的变形阻力。由于晶粒间的这种相互约束，使得多晶体金属的塑性变形抗力提高。

晶粒大小的影响：金属的晶粒越细，其强度和硬度越高；金属的晶粒越细，其塑性和韧性也越高。

**细晶强化：**通过细化晶粒来同时提高金属的强度、硬度、塑性和韧性的方法

**塑性变形对组织结构的影响：**晶粒变形；晶粒“破碎”；晶粒位向趋于一致

晶粒变形：金属发生塑性变形时，不仅外形发生变化，而且其内部的晶粒也相应地被拉长或压扁；当变形量很大时，晶粒将被拉长为纤维状，晶界变得模糊不清。

晶粒“破碎”：塑性变形还使晶粒破碎为亚晶粒

晶粒位向趋于一致：织构或择优取向；“制耳”现象

**塑性变形对金属性能影响：**加工硬化；各向异性；理化性能改变

加工硬化：原因：晶格歪扭、晶粒破碎、位错密度增加

**塑性变形：残余应力**

宏观内应力：第一类内应力平衡于表面与心部之间

微观内应力：第二类内应力平衡于晶粒之间或晶粒内不同区域之间

畸变应力：第三类内应力是由晶格缺陷引起的

第三类内应力是形变金属中的主要内应力，也是金属强化的主要原因。而第一、二类内应力都使金属强度降低。

**冷变形金属在加热时的组织和性能变化：**回复；再结晶；晶粒长大

**回复：**回复是指在加热温度较低时，由于金属中的点缺陷及位错近距离迁移而引起的晶内某些变化。如空位与其他缺陷合并、同一滑移面上的异号位错相遇合并而使缺陷数量减少等。

其强度、硬度略有下降，塑性略有提高，但内应力、电阻率等显著下降。

应力退火：利用回复现象将冷变形金属低温加热，既稳定组织又保留加工硬化

**再结晶：**当变形金属被加热到较高温度时，由于原子活动能力增大，晶粒的形状开始发生变化，由破碎拉长的晶粒变为完整的等轴晶粒。

再结晶也是一个晶核形成和长大的过程，但不是相变过程，再结晶前后新旧晶粒的晶格类型和成分完全相同。

金属的强度、硬度下降，塑性、韧性提高，加工硬化消失。

**晶粒长大：**再结晶完成后，若继续升高加热温度或延长保温时间，将发生晶粒长大，这是一个自发的过程。

晶粒的长大是通过晶界迁移进行的，是大晶粒吞并小晶粒的过程。晶粒粗大会使金属的强度，尤其是塑性和韧性降低

再结晶温度：再结晶不是一个恒温过程，它是自某一温度开始，在一个温度范围内连续进行的过程，发生再结晶的最低温度称再结晶温度。

**再结晶影响因素：**金属的预先变形程度；金属的纯度；再结晶加热速度和加热时间

金属的预先变形程度： $\tau_{再} \approx 0.4T_{熔}$

金属的纯度：金属中的微量杂质或合金元素，尤其高熔点元素起阻碍扩散和晶界迁移作用，使再结晶温度显著提高。

再结晶加热速度和加热时间：提高加热速度会使再结晶推迟到较高温度发生，延长加热时间，使原子扩散充分，再结晶温度降低。生产中，把消除加工硬化的热处理称为再结晶退火。再结晶退火温度比再结晶温度高  $100 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 。

**影响再结晶退火后晶粒度的因素：**加热温度和保温时间；预先变形度

加热温度和保温时间：加热温度越高，保温时间越长，金属的晶粒越粗大，加热温度的影响尤为显著。

预先变形度：预先变形度的影响，实质上是变形均匀程度的影响；当变形度很小时，晶格畸变小，不足以引起再结晶；当变形达到  $2 \sim 10\%$  时，只有部分晶粒变形，变形极不均匀，再结晶晶粒大小相差悬殊，易互相吞并和长大，再结晶后晶粒特别粗大，这个变形度称临界变形度；对于某些金属，当变形量相当大时（ $90\%$ ），再结晶后晶粒又重新出现粗化现象，一般认为这与形成织构有关。

**金属的热变形：**

冷热加工的区别：低于再结晶温度的加工称为冷加工，而高于再结晶温度的加工称为热加工。

热加工时产生的加工硬化很快被再结晶产生的软化所抵消，因而热加工不会带来加工硬化效果。

热加工对金属组织和性能的影响：热加工可使铸态金属与合金中的气孔焊合，使粗大的树枝晶或柱状晶破碎，从而使组织致密、成分均匀、晶粒细化，力学性能提高；在制定加工工艺时，应使流线分

布合理，尽量与拉应力方向一致；带状组织与枝晶偏析被沿加工方向拉长有关，可通过多次正火或扩散退火消除。

**冷热区别：**热加工能量消耗小，但钢材表面易氧化。一般用于截面尺寸大、变形量大、在室温下加工困难的工件；而冷加工一般用于截面尺寸小、塑性好、尺寸精度及表面光洁度要求高的工件。

**合金：**由两种或两种以上元素组成的具有金属特性的物质，组成合金的元素可以是全部是金属，也可能是金属与非金属

**合金系：**两个或两个以上元素按不同比例配制的一系列不同成分的合金。

**组元：**组成合金的最简单、最基本、能够独立存在的物质。

**相：**金属或合金中，凡具有相同的化学成分、相同的晶体结构和相同的聚集状态并由界面彼此分开的均匀组成部分。

**显微组织：**在显微镜下观察到的金属中各相或各晶粒的形态、数量、大小和分布的组合。

**固溶体：**溶质原子溶入溶剂的晶格中所形成的单相固体。按溶质原子所处位置分为置换固溶体和间隙固溶体。

**置换固溶体：**溶质原子置换溶剂晶格某些结点位置上原子所形成的单相固溶体。组成元素原子半径、电化学特性相近，晶格类型相同的置换固溶体，才有可能形成无限固溶体。

**间隙固溶体：**溶质原子嵌入溶剂晶格间隙所形成的单相固体。**都是有限固溶体**

**固溶体的性能：**

**固溶强化：**随溶质含量增加，固溶体的强度、硬度增加，塑性、韧性下降。原因：溶质原子使晶格发生畸变及对位错的钉扎作用。

与纯金属相比，固溶体的强度、硬度高，塑性、韧性低。但与化合物相比，其硬度要低得多，而塑性和韧性则要高得多。

**金属化合物：**两种元素（其一为金属）自液态转变为固态时，相互作用形成的一种新相

**特点：**金属化合物具有较高的熔点、硬度和脆性，并可用分子式表示其组成。

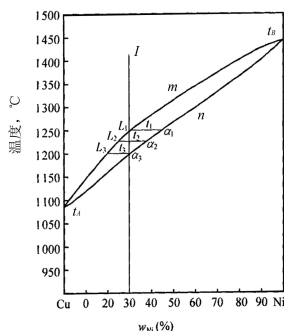
化合物可提高金属强度、硬度和耐磨性，但降低塑性。

**机械混合物：**是两种以上的相组成，相之间不发生作用而是以各自独立的晶体混合存在。

**相图：**用来表示合金系中合金的相组织与温度成分之间关系的图解，即表示合金系在不同的温度和成分时，合金中各相的状态，又称状态图。**制订熔炼、铸造、热加工及热处理工艺的重要依据。**

**平衡图：**由于合金的相变化过程是在极其缓慢的冷却条件下即平衡条件下完成的。

**二元匀晶相图：**两组元在液态和固态下均无限互溶时所构成的相图



**匀晶转变或匀晶反应：**从液相中结晶出单一固相的转变

成分变化是通过原子扩散完成的。当合金冷却到  $t_3$  时，最后一滴  $L_3$  成分的液体也转变为固溶体，此时固溶体的成分又变回到合金成分  $\alpha_3$  上来；

液固相线不仅是相区分界线，也是结晶时两相的成分变化线；

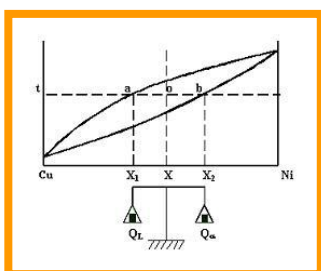
匀晶转变是变温转变。

**杠杆定律：**合金在某温度下两平衡相的重量比等于该温度下与各自相区距离较远的成分线段之比。**杠杆定律只适用于两相区。**

确定两平衡相的成分；确定两平衡相的相对重量；

在杠杆定律中，杠杆的支点是合金的成分，杠杆的端点是所求的两平衡

相（或两组织组成物）的成分。



设合金的重量为 1，液相重量为  $Q_L$ ，固相重量为  $Q_\alpha$ 。

则  $Q_L + Q_\alpha = 1$

$Q_L X_1 + Q_\alpha X_2 = X$

解方程组得

$$Q_L = \frac{X_2 - X}{X_2 - X_1}$$

$$Q_\alpha = \frac{X - X_1}{X_2 - X_1}$$

$$Q_L = \frac{xx_2}{x_1x_2} = \frac{ob}{ab}$$

$$Q_\alpha = \frac{xx_1}{x_1x_2} = \frac{ao}{ab}$$

因此两相的相对重量百分比为：

两相的重量比为： $\frac{Q_L}{Q_\alpha} = \frac{xx_2}{x_1x} (= \frac{ob}{ao})$  或  $Q_L \cdot x_1x = Q_\alpha \cdot xx_2$

**枝晶偏析：** 在一个枝晶范围内或一个晶粒范围内成分不均匀现象

冷速越大，液固相线间距越大，枝晶偏析越严重；枝晶偏析会影响合金的力学、耐蚀、加工等性能

**扩散退火：** 生产上常将铸件加热到固相线以下 100-200℃长时间保温，以使原子充分扩散、成分均匀，消除枝晶偏析的工艺。

**共晶转变或共晶反应：** 在一定温度下，由一定成分的液相同时结晶出两个成分和结构都不相同的新固相的转变。

**共析反应(共析转变)：** 在一定温度下，由一定成分的固相同时析出两个成分和结构完全不同的新固相的过程。

**铁碳合金：** 含碳量为 0.0218%~2.11%的称钢，含碳量为 2.11%~6.69%的称铸铁

**同素异构转变：** 金属在温度（压力）改变时发生晶体结构变化的现象。

**铁碳合金的相：** 铁素体；奥氏体；渗碳体

铁素体：碳在 $\alpha$ -Fe 中的固溶体称铁素体，用 F 或  $\alpha$  表示

碳在 $\delta$ -Fe 中的固溶体称 $\delta$ -铁素体，用 $\delta$  表示

奥氏体： 碳在 $\gamma$ -Fe 中的固溶体称奥氏体,用 A 或  $\gamma$  表示； **碳钢室温组织中无奥氏体。**

渗碳体：  $Fe_3C$ , 含碳 6.69%，用  $Fe_3C$  或  $C_m$  表示；  **$Fe_3C$  硬度高、强度低 脆性大， 塑性几乎为零**

**铁碳合金的组成物：** 珠光体；莱氏体

珠光体：铁素体 F 和渗碳体  $Fe_3C$  组成的机械混合物，用符号 P 表示； **力学性能介于 F 和  $Fe_3C$  之间，**

**综合力学性能较好**

莱氏体： 共晶转变的产物，用符号  $L_d$  表示； **硬度很高，塑性很差**

**高温莱氏体：** 渗碳体为基体上分布着奥氏体

**低温莱氏体：** 渗碳体为基体上分布着珠光体

**铁碳合金的分类：** 工业纯铁；钢；白口铸铁

**工业纯铁：** (<0.0218% C)，组织为单相铁素体

**钢：** (0.0218~2.11%C)

**亚共析钢 0.0218~0.77%C**

亚共析钢随含碳量增加，P 量增加，钢的强度、硬度升高，塑性、韧性下降。

**共析钢 0.77%C**

0.77%C 时，组织为 100% P， 钢的性能即 P 的性能。

**过共析钢 0.77~2.11%C**

>0.9%C,  $Fe_3C_{II}$  为晶界连续网状，强度下降， 但硬度仍上升

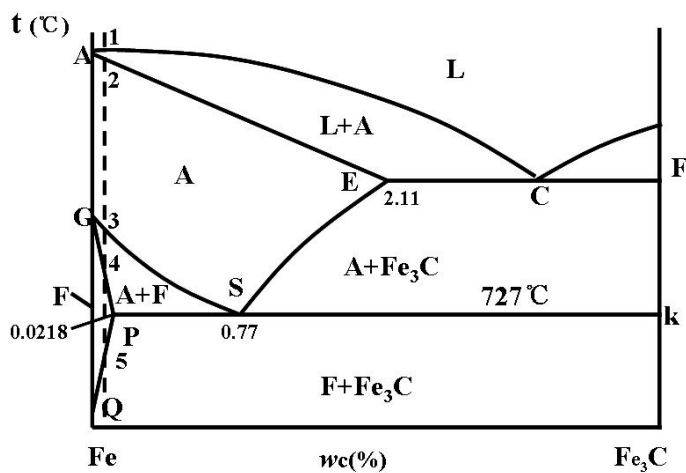
>2.11%C，组织中有以  $Fe_3C$  为基的  $Le'$ ，合金太脆。

**白口铸铁：** (2.11~6.69%C)；铸造性能好，硬而脆

亚共晶白口铸铁 2.11~4.3%C

共晶白口铸铁 4.3%C

过共晶白口铸铁 4.3~6.69%C



Fe - Fe<sub>3</sub>C 相图

### 线:

液相线—ACD

固相线—AHJECFD

ECF: 共晶线  $L_c \rightleftharpoons A_2 + Fe_3C$

含碳量为 2.11%~6.69% 的铁碳合金冷却到此线时, 会发生共晶反应。共晶产物是  $A$  与  $Fe_3C$  的机械混合物, 称作莱氏体, 用  $L_d$  表示。为蜂窝状, 以  $Fe_3C$  为基, 性能硬而脆。

PSK: 共析线

$\gamma_s \rightleftharpoons F + Fe_3C$  共析转变的产物是  $F$  与  $Fe_3C$  的机械混合物, 称作珠光体, 用  $P$  表示

GS, GP— $\alpha$  固溶体转变线, GS 又称  $A_s$  线

ES—碳在  $A$  中的固溶线。又称  $A_{cm}$  线

PQ—碳在  $\alpha$ -Fe 中的固溶线

### 相区:

三个单相区:  $L$ 、 $A$ 、 $F$

五个两相区:  $L+A$ 、 $L+Fe_3C$ 、 $A+Fe_3C$ 、 $A+F$ 、 $F+Fe_3C$

二个三相区: ECF ( $L+A+Fe_3C$ )、PSK ( $A+F+Fe_3C$ ) 三条水平线 \

### 在选材方面的应用:

建筑结构和各种型钢需用塑性、韧性好的材料, 应选用碳含量较低的钢材 (小于 0.25%)

各种机械零件需用强度、塑性及韧性都较好的材料, 应选用碳含量适中的中碳钢 (0.25%~0.6%)

各种工具需用硬度高和耐磨性好的材料, 应选用碳含量高的钢种 (大于 0.6%)。

白口铸铁硬度高、脆性大, 不能切削加工, 也不能锻造, 但其耐磨性好, 铸造性能优良, 适用于作要求耐磨、不受冲击、形状复杂的铸件, 例如拔丝模、冷轧辊、货车轮、犁铧、球磨机的磨球等

### 在制订热加工工艺工艺方面的应用: 铸造工艺; 锻造工艺

**铸造工艺:** 根据 Fe -  $Fe_3C$  相图可以确定合金的浇注温度, 浇注温度一般在液相线以上  $50 \sim 100^\circ C$ 。

共晶合金铸造性能最好。铸钢件含碳量控制在 0.15%~0.6%

**锻造工艺:** 锻造或轧制选在单相奥氏体区内进行。

一般始锻、始轧温度控制在固相线以下  $100 \sim 200^\circ C$  范围内, 终锻、终轧温度不能过低。

亚共析钢热加工终 (轧) 锻温度多控制在 GS 线以上一点;

过共析钢（轧）锻温度应控制在  $PSK$  线以上一点，一般始锻温度为  $1150 \sim 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，终锻温度为  $800 \sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

## 钢的热处理：

**热处理：**是指将钢在固态下加热、保温和冷却，以改变钢的组织结构，获得所需要性能的一种工艺

**热处理特点：**只通过改变工件的组织来改变性能，而不改变其形状

**热处理适用范围：**只适用于固态下发生相变的材料

**热处理分类：** **热处理原理：**基于同素异构转变、共析转变、固溶和脱溶等固态下的组织转变来实现改变材料性能；**热处理工艺：**根据热处理原理制定的温度、时间、介质等参数称热处理工艺

普通热处理	退火正火淬火回火
表面热处理	表面淬火—感应加热、火焰加热、电接触加热等 化学热处理—渗碳、氮化、碳氮共渗、渗其他元素等
其他热处理	控制气氛热处理；真空热处理；形变热处理；激光热处理

**预备热处理：**为随后的加工（冷拔、冲压、切削）或进一步热处理作准备的热处理

**最终热处理：**赋予工件所要求的使用性能的热处理

## **钢在加热时的组织转变：**

**不发生相变的加热：**在  $A_1$  以下加热

**发生相变的加热：**在临界点以上加热，目的是获得均匀的奥氏体组织，称奥氏体化

## **奥氏体的形成过程：**

**奥氏体晶核形成：**首先在  $F$  与  $Fe_3C$  相界形核

**奥氏体晶核长大：** $A$  晶核通过碳原子的扩散向  $F$  和  $Fe_3C$  方向长大

**残余  $Fe_3C$  溶解：**铁素体的成分、结构更接近于奥氏体，因而先消失。残余的  $Fe_3C$  随保温时间延长继续溶解直至消失

**奥氏体成分均匀化：** $Fe_3C$  溶解后，其所在部位碳含量仍很高，通过长时间保温使奥氏体成分趋于均匀

## **奥氏体晶粒长大及其影响因素：**

**奥氏体晶粒度：**起始晶粒度：奥氏体化刚结束时的晶粒度

实际晶粒度：在给定温度下奥氏体的晶粒度

本质晶粒度：加热时奥氏体晶粒的长大倾向

**影响奥氏体晶粒长大的因素：**加热温度和保温时间：加热温度高、保温时间长， $A$  晶粒粗大

加热速度：加热速度越快，过热度越大，形核率越高，晶粒越细

钢的成分：含碳量越低，晶粒越细小，随含碳量增加晶粒长大倾向变大

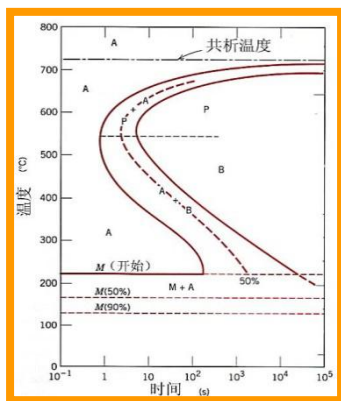
阻碍奥氏体晶粒长大的元素： $V$ 、 $Ti$ 、 $Nb$ 、 $Mo$ 、 $Cr$ 、 $Ta$ 、 $Zr$ 、 $W$ 、 $Al$  等碳化物和氮化物形成元素

促进奥氏体晶粒长大的元素： $Mn$ 、 $P$ 、 $C$ 、 $N$

## **钢在冷却时的组织转变：等温冷却；连续冷却**

**过冷奥氏体：**处于临界点  $A_1$  以下的奥氏体（是非稳定组织）





C 曲线、S 曲线或 TTT 曲线

过冷奥氏体等温转变产物的组织与性能：高温转变：珠光体 (P)，索氏体 (S)，托氏体 (T)

中温转变：贝氏体 (B)

低温转变：马氏体 (M)，强化钢

珠光体 ( $A_1$ -650°C)：珠光体转变也是形核和长大的过程；扩散型转变

索氏体 (650-600°C)：

托氏体 (600-550°C)：分子间距最小，硬度最大

上贝氏体  $B_{\text{上}}$  (550-350°C)：奥氏体消失；羽毛状，不连续棒状的渗碳体；分布于自奥氏体晶界向晶内平行生长的铁素体条之间

下贝氏体 (350- $M_s$  (230) °C)：C 原子扩散能力低，铁原子不扩散；细片状碳化物分布于铁素体针

马氏体：无扩散性 极大过冷度冷至  $M_s$  以下 碳在  $\alpha$ -Fe 中的过饱和固溶体称马氏体

当奥氏体过冷到  $M_s$  以下将转变为马氏体类型组织 马氏体转变是强化钢的重要途径之一

马氏体转变的特点：无扩散性（含碳量与奥氏体的含碳量相同）；共格切变性（浮凸现象）；

降温形成（上马氏体点， $M_s$ ；下马氏体点  $M_f$ ）；高速长大（）；转变不完全（残留奥氏体  $A'$  或  $\gamma'$ ）

$M_s$ 、 $M_f$  与冷速无关，主要取决于奥氏体中的合金元素含量（包括碳含量）；马氏体转变后， $A'$  量随含碳量的增加而增加；奥氏体中的碳全部保留到马氏体

马氏体的形态：分板条（位错马氏体）；针状（孪晶马氏体）

分板条： $C\% < 0.2\%$ ；板条与针状的混合组织： $0.2\% < C\% < 1.0\%$ ；针状： $C\% > 1.0\%$

马氏体的性能：高硬度（含碳量  $> 0.6\%$  时，硬度趋于平缓，合金元素对马氏体硬度的影响不大）；

马氏体强化的主要原因：过饱和碳引起的固溶强化；马氏体转变产生的组织细化也有强化作用。

塑性和韧性主要取决于其亚结构的形式，针状马氏体脆性大，板条马氏体具有较好的塑性和韧性

### 过冷奥氏体转变产物（共析钢）

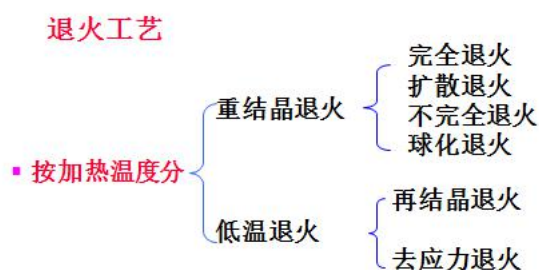
转变类型	转变产物	形成温度, °C	转变机制	显微组织特征	HRC	获得工艺
珠光体	P	$A_1$ -650	扩散型	粗片状, F、 $Fe_3C$ 相间分布	5-20	退火
	S	650-600		细片状, F、 $Fe_3C$ 相间分布	20-30	正火
	T	600-550		极细片状, F、 $Fe_3C$ 相间分布	30-40	等温处理
贝氏体	$B_{\text{上}}$	550-350	半扩散型	羽毛状, 短棒状 $Fe_3C$ 分布于过饱和 F 条之间	40-50	等温处理
	$B_{\text{下}}$	350- $M_s$		竹叶状, 细片状 $Fe_3C$ 分布于过饱和 F 针上	50-60	等温淬火
马氏体	$M_{\text{针}}$	$M_s$ - $M_f$	无扩散型	针状	60-65	淬火
	$M_{\text{板条}}$	$M_s$ - $M_f$		板条状	50	淬火

过冷奥氏体连续冷却转变：CCT (Continuous-Cooling-Transformation diagram) 曲线

没有贝氏体转变区，在珠光体转变区之下多了一条转变中止线

**钢的退火：**将钢加热至适当温度保温，然后缓慢冷却（炉冷）的热处理工艺叫做退火

**退火目的：**调整硬度，便于切削加工。适合加工的硬度为 180-250HB；消除硬化，提高塑性；消除组织缺陷，细化晶粒，改善性能；消除内应力，防止加工中变形；为最终热处理作组织准备。



■按冷却方式分：等温退火和连续退火

完全退火：将工件加热到  $Ac_3+30\sim 50^\circ C$  保温后缓冷的退火工艺；0.3~0.6%C 的亚共析钢，低碳钢和过共析钢不适用

**目的：**消除组织缺陷；细化晶粒、均匀组织、消除内应力；降低硬度、改善切削加工性

球化退火：将工件加热到  $Ac_1+30\sim 50^\circ C$  保温后缓冷，或者加热后冷却到略低于  $Ar_1$  的温度下保温，使珠光体中的渗碳体球化后出炉空冷；共析钢、过共析钢、合金工具钢

等温退火：亚共析钢加热到  $Ac_3+30\sim 50^\circ C$ ，共析、过共析钢加热到  $Ac_1+30\sim 50^\circ C$ ，保温后快冷到  $Ar_1$  以下的某一温度下停留，待相变完成后出炉空冷；中碳（0.25~0.6%C）合金钢

**优点：**等温退火可缩短工件在炉内停留时间，更适合于孕育期长的合金钢

扩散退火：加热至略低于固相线；目的：使成分、组织均匀

再结晶退火：加热温度  $T_{再} + 100\sim 200^\circ C$ ；目的：消除加工硬化

去应力退火：加热温度  $< Ac_1$ ，一般为  $500\sim 600^\circ C$ ；目的：消除冷热加工后的内应力

**钢的正火：**正火是将亚共析钢加热到  $Ac_3+30\sim 50^\circ C$ ，共析钢加热到  $Ac_1+30\sim 50^\circ C$ ，过共析钢加热到  $Ac_{cm}+30\sim 50^\circ C$  保温后空冷的工艺；**正火比退火冷却速度大**

**正火后的组织：** F+S、S、 $Fe_3C_{II}+S$

**正火的目的：**对于低、中碳钢( $\leq 0.6\% C$ )，目的与退火的相同；对于过共析钢，用于消除和减少网状二次渗碳体，为球化退火作组织准备；普通件最终热处理

**要改善切削性能，低碳钢用正火，中碳钢用退火或正火,高碳钢用球化退火**

**钢的淬火：**将钢加热到临界点以上，保温后以大于  $V_k$  速度冷却，使奥氏体转变为马氏体

**目的：**为获得马氏体组织，提高钢的性能

**加热环节：**淬火温度为  $Ac_3+30\sim 50^\circ C$ ；预备热处理为退火或正火组织

（亚共析钢）： $\leq 0.5\% C$  时为 M； $> 0.5\% C$  时为 M+A'

**在  $Ac_1\sim Ac_3$  之间的加热淬火称亚温淬火：**组织为 F+M，强硬度低，但塑韧性好

（共析钢）：淬火温度为  $Ac_1+30\sim 50^\circ C$ ；淬火组织为 M+A'

（过共析钢）：淬火温度:  $Ac_1+30\sim 50^\circ C$ ；温度高于  $Ac_{cm}$ ，则奥氏体晶粒粗大、含碳量高,淬火后马氏体

晶粒粗大、 $A'$ 量增多。使钢硬度、耐磨性下降，脆性、变形开裂倾向增加。

淬火组织： $M+Fe_3C_{\text{颗粒}}+A'$ 。（预备组织为 $P_{\text{球}}$ ）

（合金钢）：合金元素(Mn、P 除外)对奥氏体晶粒长大有阻碍作用，因而合金钢淬火温度比碳钢高

亚共析钢淬火温度为  $A_{c3}+50\sim 100^{\circ}\text{C}$ ；共析钢、过共析钢淬火温度为  $A_{c1}+50\sim 100^{\circ}\text{C}$

#### 加热设备及保温时间：

**保温目的：**使相变过程能够充分进行（过剩相充分溶解），使组织充分转变到淬火需要的形态。

**保温时间：**主要取决于成分、原始组织及加热温度。温度愈高，相变速率愈大，所需保温时间愈短。为获得细晶粒组织并防止晶粒长大，在保证强化相全部溶解的前提下，尽量采用快速加热及短的保温时间是合理的

#### 冷却环节：

**冷却介质：**水的冷却能力强，但低温冷却能力太大，只适用于形状简单的碳钢件

油在低温区冷却能力较理想，但高温区冷却能力太小，适用于合金钢和小尺寸的碳钢件。

熔盐作为淬火介质称盐浴，冷却能力在水和油之间，用于形状复杂件的分级淬火和等温淬火

#### 冷却方式：

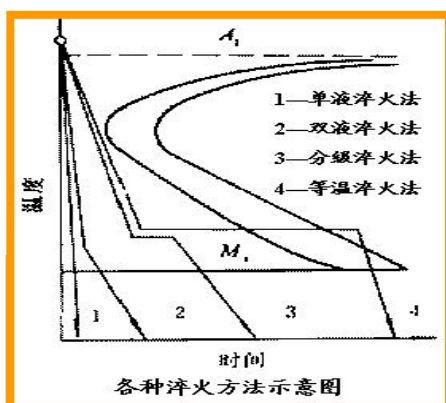
**单液淬火法：**适用于碳钢及合金钢简单零件淬火

**双液淬火法：**优点是冷却理想，缺点是不易掌握；用于形状复杂的碳钢件及大型合金钢件

**分级淬火法：**可减少内应力；用于小尺寸工件（刀具和量具）

**等温淬火法：**获得下贝氏体，良好的综合力学性能，淬火应力小；用于形状复杂的小型件

**冷处理：**适用于柴油机精密偶件及贵重工模具



**钢的淬透性：**钢在淬火时获得淬硬层深度的能力

淬透性是钢的主要热处理性能；是选材和制订热处理工艺的重要依据之一

**淬硬层深度：**由工件表面到半马氏体区(50%M + 50%P)的深度

**淬硬性：**钢淬火后所能达到的最高硬度，即硬化能力

钢的淬透性取决于临界冷却速度  $V_k$ ， $V_k$  越小，淬透性越高； $V_k$  取决于 C 曲线的位置，C 曲线越靠右， $V_k$  越小；因而凡是影响 C 曲线的因素都是影响淬透性的因素。即除 Co 外，凡溶入奥氏体的合金元素都使钢的淬透性提高；奥氏体化温度高、保温时间长也使钢的淬透性提高。

**淬火缺陷：**淬火硬度低（HRC60 左右）；变形和开裂

**淬火硬度低：**加热不足；表面产生加热缺陷；冷速不足或冷却不均匀，未获得全部马氏体组织；淬火介质不良或钢件表面不清洁，影响冷却速度

**变形和开裂：**淬火应力（组织应力；温差应力）

**钢的回火：**将淬火钢加热到  $A_1$  以下的某温度保温后在空气中冷却的工艺

**目的：**减少或消除淬火内应力，防止变形或开裂；获得所需要的力学性能。淬火钢一般硬度高，脆性大，回火可调整硬度、韧性；稳定尺寸；对于某些高淬透性的钢，空冷即可淬火，如采用回火软化既能降低硬度，又能缩短软化周期

**未经淬火的钢回火无意义，而淬火钢不回火在放置使用过程中易变形或开裂，钢经淬火后应立即进行回火**

**钢在回火时的组织转变：**马氏体的分解；残余奥氏体分解； $\epsilon$ -碳化物转变为  $Fe_3C$ ；

$Fe_3C$  聚集长大和铁素体多边形成

**马氏体的分解：** $<100^{\circ}C$  回火时，钢的组织无变化； $100\sim 200^{\circ}C$  加热时，马氏体将发生分解，从马氏体中析出  $\epsilon$ -碳化物 ( $\epsilon-Fe_3C$ )，使马氏体过饱和度降低。析出的碳化物以细片状分布在马氏体基体上，这种组织称回火马氏体，用  $M_{回}$  表示；在光镜下  $M_{回}$  为黑色， $A'$  为白色  $< 0.2\%C$  时，不析出碳化物，只发生碳在位错附近的偏聚

**残余奥氏体分解：** $200\sim 300^{\circ}C$  时，由于马氏体分解，奥氏体所受的压力下降， $M_s$  上升， $A'$  分解为  $\epsilon$ -碳化物和过饱和铁素体，即  $M_{回}$

**$\epsilon$ -碳化物转变为  $Fe_3C$ ：**发生于  $300\sim 400^{\circ}C$ ，此时， $\epsilon$ -碳化物溶解于 F 中，并从铁素体中析出  $Fe_3C$ 。到  $350^{\circ}C$ ，马氏体含碳量降到铁素体平衡成分，内应力大量消除， $M_{回}$  转变为在保持马氏体形态的铁素体基体上分布着细粒状  $Fe_3C$  组织，称回火托氏体，用  $T_{回}$  表示

**回火  $M$  转变为在保持  $M$  形态的 F 基体上分布着极其细小的渗碳体颗粒**

**$Fe_3C$  聚集长大和铁素体多边形化：** $400^{\circ}C$  以上， $Fe_3C$  开始聚集长大； $450^{\circ}C$  以上铁素体发生多边形化，由针片状变为多边形；这种在多边形铁素体基体上分布着颗粒状  $Fe_3C$  的组织称回火索氏体，用  $S_{回}$  表示

**由原来  $M$  组织形态变成多边形 F 与颗粒状渗碳体组成的组织称为回火 S**

**回火后的组织和性能：**回火时力学性能变化总的趋势是随回火温度提高，钢的强度、硬度下降，塑性、韧性提高

**回火种类：**低温回火；中温回火；高温回火；高温软化回火

**低温回火 ( $150\sim 250^{\circ}C$ )：**低温回火的组织：回火马氏体 ( $M'$ )；

性能：HRC58~60；

目的：为了降低淬火钢的应力和脆性，提高韧性，而保持高硬度和耐磨性。

应用：适用于各类高碳钢的刀具、冷作模具、量具；滚动轴承；渗碳或表面淬火件等

**中温回火 ( $350\sim 500^{\circ}C$ )：**中温回火的组织：回火托氏体 ( $T'$ )

性能：硬度达到 HRC35~45，有较高的弹性极限  $\sigma_s$  和屈服极限  $\sigma_s$ 。

目的：回火可显著减少工件的淬火应力，具有较高的弹性极限和屈服极限，并有一定的韧性。

应用：它主要应用于各种弹簧、弹性夹头及锻模的处理。

**高温回火 ( $500\sim 650^{\circ}C$ )：**高温回火的组织：回火索氏体 ( $S'$ )

性能：硬度 HB200~350，较好的综合机械性能

目的：可使工件获得强度、硬度、塑性和韧性都较好的综合机械性能。

淬火后高温回火的热处理称为调质处理，简称调质，

常用于受力情况复杂的重要零件，如各种轴类、齿轮、连杆等。

**高温软化回火 ( $640\sim 680^{\circ}C$ )：**组织：回火珠光体 ( $P'$ )

性能：强度低、塑性好和优良的可切削加工性

主要用于马氏体钢的软化和高碳合金钢的淬火返修，以代替球化退火

**回火脆性：**在某些温度范围内回火时，会出现冲击韧性下降的现象；淬火钢的韧性并不总是随温度升高而提高

**第一类回火脆性 (不可逆回火脆性)：** $250\sim 350^{\circ}C$  回火时；回火时应避开这一温度范围

**第二类回火脆性 (可逆回火脆性)：** $500\sim 650^{\circ}C$  回火后缓冷时；更适用于大截面的零部件

## 钢的表面改性处理:

**强化表面:** 改变表面组织, 不改变心部组织—表面淬火

**表面淬火:** 利用快速加热将表层奥氏体化后进行淬火以强化零件表面的热处理

**表面淬火目的:** 使表面具有高的硬度、耐磨性和疲劳极限; 心部在保持一定的强度、硬度的条件下, 具有足够的塑性和韧性。即表硬里韧; 适用于承受弯曲、扭转、摩擦和冲击的零件

**表面淬火适用材料:** 0.4-0.5%C 的中碳钢; 含碳量过低, 则表面硬度、耐磨性下降; 含碳量过高, 心部韧性下降; 铸铁 提高其表面耐磨性。

**步骤:** 预备热处理 (调质或正火); 表面淬火后的回火 (低温回火, 降低内应力, 保留淬火高硬度、耐磨性); 表面淬火+低温回火后的组织 (表层组织为  $M_{\text{H}}$ ; 心部组织为  $S_{\text{H}}$  (调质) 或  $F+S$  (正火))

**表面淬火常用加热方法:** 感应加热; 火焰加热; 激光热处理

**改变表面的化学成和组织:** 表面化学热处理—渗碳、氮、硼及碳氮共渗

**化学热处理的基本过程:** 介质 (渗剂) 的分解: 分解的同时释放出活性原子; 工件表面的吸收: 活性原子向固溶体溶解或与钢中某些元素形成化合物; 原子向内部扩散。

### 钢的渗碳:

**渗碳目的:** 提高工件表面硬度、耐磨性及疲劳强度, 同时保持心部良好的韧性

**渗碳用钢:** 为含 0.1-0.25%C 的低碳钢。碳高则心部韧性降低

**渗碳方法:** 气体渗碳法 (优点: 质量好, 效率高; 缺点: 渗层成分与深度不易控制); 固体渗碳法 (渗剂为木炭; 优点: 操作简单; 缺点: 渗速慢, 劳动条件差); 真空渗碳法: (优点: 表面质量好, 渗碳速度快;)

**渗碳温度:** 900-950°C; **渗碳层厚度:** 表面到过度层一半处的厚度;

**渗碳缓冷后组织:** 表层为  $P$ +网状  $Fe_3C_{II}$ ; 心部为  $F+P$ ; 中间为过渡区

**渗碳后的热处理:** 淬火+低温回火 常用方法是渗碳缓冷后, 重新加热到  $A_{c1}+30-50^{\circ}\text{C}$  淬火+低温回火。此时组织为: 表层:  $M_{\text{H}}$ +颗粒状碳化物+ $A'$  (少量); 心部:  $M_{\text{H}}+F$  (淬透时)

**钢的氮化:** 中碳钢; 氮化温度为 500-570°C

**氮化的特点:** 耐磨性高; 工件变形小; 耐蚀性好; 疲劳强度高, 表面存在压应力。

(仪表的小轴、轻载齿轮及重要的曲轴)

氮化的缺点: 工艺复杂, 成本高, 氮化层薄