



寄语：

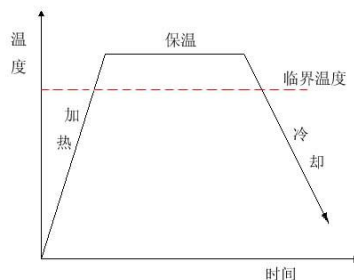
- 1.热处理中不断出现各种各样的组织，马氏体、奥氏体、珠光体、铁素体、渗碳体以及各种碳化物，如果仅仅记住这些组织的名称，则理解不到其组织间的关系和其本质，只有了解其演变过程才能更好地了解其本质，所有这些组织也都是由各不相同的基本组织构成，在学习时要切记从基本组织和本质入手。
- 2.由于教学的原因，给出的工艺参数并不都是具体的，具体情况要具体分析，抓住要找到的核心问题，即组织变化的所需要的参数。
- 3.在合金钢中，出现了各种各样的合金钢，一种钢号同属于不同钢种的情况很多，容易造成混乱，把握这些钢种所需求的性能和热处理方法，找到其碳含量和合金元素的需求的原因能够更好的帮助理解。
- 4.合金钢中，各个钢号的名称中数字所代表的元素含量大多数通用，但有些特殊的含量要特殊记忆。
- 5.合金钢中由于合金元素的加入，改变了钢中转变温度和转变点，不能继续按照普通铁碳相图的数据认定钢的种类，如：3Cr2W8V（过共析钢，C：0.3-0.4%）。

## 1 热处理原理及工艺

### 1-1 概述

#### 一、热处理及其目的

- 1.热处理：按照一定的规程，通过加热、保温和冷却的方法，来改变钢内部组织结构，从而改变其性能的一种工艺。用热处理曲线表示。
- 2.目的：改变工件的组织结构，得到其性能。
- 3.原理及工艺
  - （1）原理：与概念相通。
  - （2）工艺：加热速度、保温时间、冷却速度和介质。



#### 二、热处理的种类

退火

淬火

1.普通热处理回火

正火

表面淬火

2.表面热处理

化学热处理

形变热处理





### 3.特殊热处理 激光热处理

## 1-2 钢加热时的组织转变（包括保温）

### 一、奥氏体的形成过程

#### 1.加热的目的和临界温度

(1) 加热的目的:

获得均匀的奥氏体组织或者部分奥氏体组织

(2) 临界温度

平衡时  $A_1$   $A_3$   $A_{cm}$

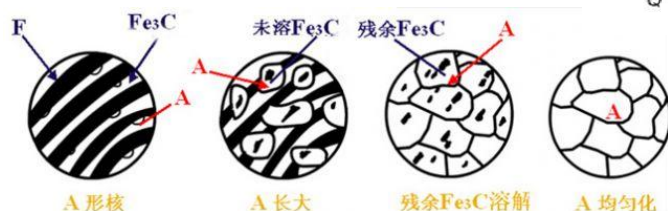
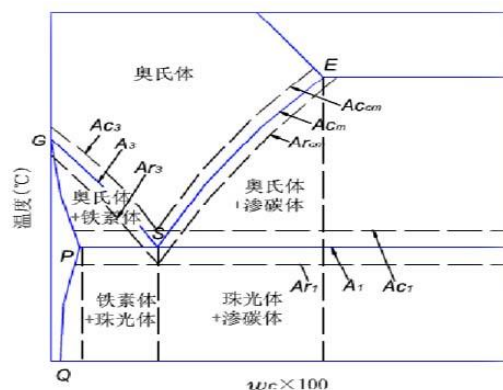
加热时（速度越快线越高）  $A_{c1}$   $A_{c3}$   $A_{ccm}$

冷却时（速度越快线越低）  $A_{r1}$   $A_{r3}$   $A_{rrm}$

（c、r 法语的加热和冷却）

#### 2.奥氏体的形成（钢的奥氏体化）

以共析钢为例，钢的奥氏体化过程如下图所示，分为四步：形核、长大、残余  $Fe_3C$  溶解、奥氏体均匀化。



### 二、奥氏体等温形成的动力学——转变速度

#### 1、一般情况

(1) 随温度的升高，转变速度上升；

(2) 四个阶段中，奥氏体化均匀速率最慢，因为碳含量趋于均匀，浓度梯度变小。

#### 2.合金元素的影响 P320、第三段

相同碳含量的合金钢和碳钢，合金钢奥氏体化的加热温度更高，保温时间更长。

### 三、奥氏体的晶粒大小及影响因素

#### 1.晶粒大小表示方法

(1) 晶粒的平均直径、平均体积、单位面积上的晶粒数

(2) 采用标准图比较

分为 8 级，数字越大，晶粒越细。

#### \*2.三个重要的晶粒度概念

(1) 起始晶粒度：珠光体刚刚全部转变为奥氏体时的晶粒度（研究用）

(2) 实际晶粒度：在具体的或实际的加热条件下得到的奥氏体晶粒度。

(3) 本质晶粒度：描述奥氏体长大倾向的强弱。（按次可将钢分为本质细晶粒钢和本质粗晶粒钢）



### 3.成分对晶粒长大的影响 P323

(1) 碳随 C 的增加晶粒长大增加条件：溶入奥氏体的 C

\* (2) 合金元素

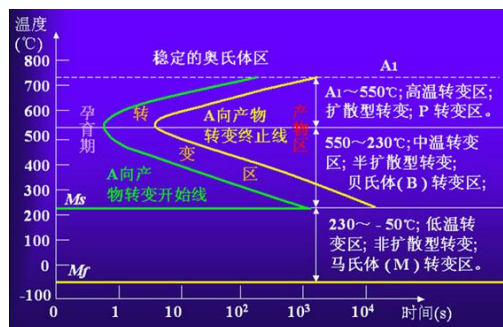
除了锰磷之外，一般合金元素阻碍奥氏体晶粒长大，如钛、钒、铌、锆等。

原因：形成碳化物，稳定且颗粒小，奥氏体化温度不溶，起钉扎作用。

Al 形成 AlN，细小的颗粒分布在晶界上，

阻碍生长。等。

### 1-3 过冷奥氏体的转变图(转变温度、时间、组织图)



冷却方式：连续冷却、等温处理

过冷奥氏体：奥氏体处于临界温度以下，热力学不稳定状态。

#### 一、过冷奥氏体等温转变图 (TTT 曲线，也叫 C 曲线)

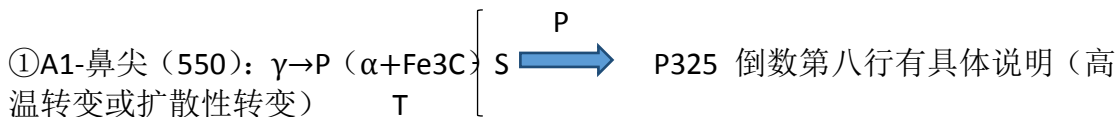
1.共析钢过冷奥氏体等温转变的热力学曲线

2.TTT 曲线 (C 曲线)

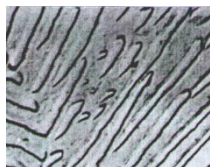
3.C 曲线分析 (温度为共析钢使得转变温度)

(1) 孕育期共析钢 550°C (鼻尖) 最不稳定

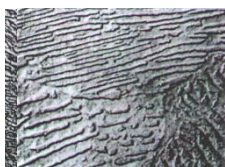
(2) 分为三个转变区



P、S、T 本质无区别，只是片层间距不同。



② 550-Ms  
变  
 $\gamma \rightarrow \text{B}$ ; B: 碳



(230°C) 中温转变或半扩散型转  
过饱和的铁素体和碳化物的机

械混合物。

B 上  $\rightarrow$  550-350°C

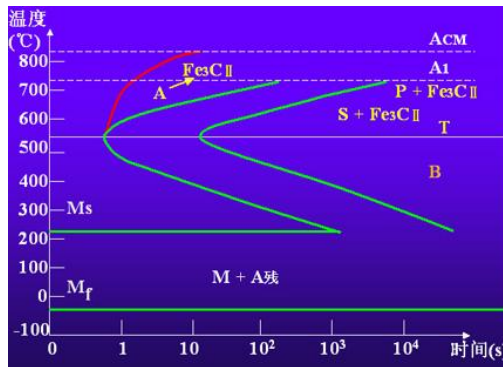
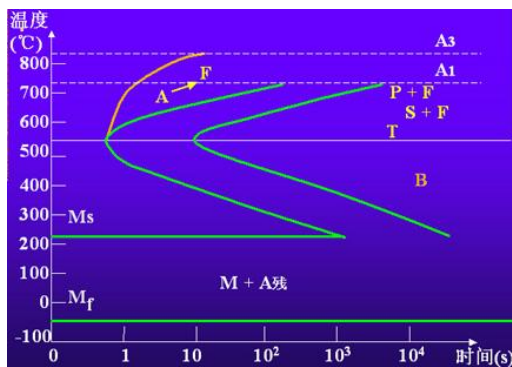
形状不同

B 下  $\rightarrow$  350°C-Ms (230°C)

③ Ms (230) -M<sub>f</sub> (-50) 非扩散型转变或低温转变

$\gamma \rightarrow \text{M}$ : 马氏体：碳在  $\alpha\text{-Fe}$  中的过饱和固溶体

#### 4.亚、过共析钢的 C 曲线





## \*二、影响 C 曲线的因素

### 1.含碳量

亚共析钢：随 C 的上升，C 曲线右移，稳定性增加。

过共析钢：随 C 的上升，C 曲线左移，稳定性下降。

由两者的规律可知，共析钢的过冷奥氏体最稳定。

### 2.合金元素

(1) 除钴外，溶入  $\gamma$  中（必须溶入，碳化物不行）的元素使 C 曲线右移。

(2) 改变 C 曲线的形状（碳化物形成元素，铬钨钒钛溶入奥氏体）

(3) 奥氏体化温度和保温时间的影响：

随温度和时间增大碳化物越均匀，奥氏体成分越均匀，奥氏体晶粒越大，C 曲线右移。

## 三、过冷奥氏体连续冷却转变曲线（CCT）

### 1.CCT 曲线的测定

### 2.CCT 曲线与 TTT 曲线的区别

(1) 临界冷却速度  $v_v$ ：奥氏体全部转变为马氏体的最小冷却速度；

(2) 连续冷却没有贝氏体转变（共析钢）。

## 1-4 珠光体转变

$A_1 \rightarrow 550^\circ\text{C}$

$\Gamma_{0.77}$  (fcc)  $\longrightarrow$  P ( $\alpha_{0.0218} + \text{Fe}_3\text{C}_{0.09}$ ) (bcc+正交)

### 一、珠光体的形态和性能

#### 1.形态：

(1) 片状

$A_1-650^\circ\text{C}$  片层间距  $> 0.3\mu\text{m}$  P

$650-600^\circ\text{C}$  片层间距  $0.1-0.3\mu\text{m}$  S

$600-550^\circ\text{C}$   $< 0.1\mu\text{m}$  T

片层间距下降，强度硬度升高，塑性更好。

(2) 粒状珠光体

粒状珠光体的总体强度硬度比片状低，塑性好。

切削加工性能好，热处理（淬火）性能好。

### 二、片状珠光体的形成过程

#### 1.分片形成机理

#### 2.分枝形成机理

### 三、粒状珠光体的形成

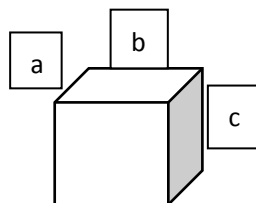
条件：1.奥氏体化温度低，得到成分不均匀的奥氏体或残留  $\text{Fe}_3\text{C}$  颗粒的奥氏体



## 2. $\gamma$ 慢冷却 $A_1$ 以下较小的过冷

### 1-5 马氏体转变

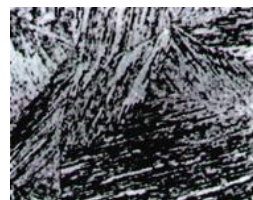
1. 冷却速度大于临界冷却速度
2.  $M$  和  $\gamma$  的成分一致
3. 铁原子和碳原子不扩散



#### 一、马氏体的晶体结构

$C < 0.2\%$      $c/a = 1$                   立方马氏体  
 $C > 0.2\%$      $c/a > 1$                   正方马氏体

$c/a$ : 马氏体的正方度



#### 二、马氏体的组织形状

1. 片状（针状）马氏体（高碳马氏体、孪晶马氏体）

光镜：针状（片状）

电镜：片中存在大量细小的孪晶

2. 板条状马氏体（低碳马氏体、位错马氏体）

光镜：平行的条状马氏体成束分布

电镜：条内存在大量的位错

3. P335 两种马氏体的形成条件

高碳马氏体的组织形态

低碳马氏体的组织形态

#### 三、马氏体的性能

高强度、高硬度

1. 影响强度和硬度的因素

主要因素是含碳量，随碳含量的增加，强度硬度越高，合金元素的影响很小。

2. 马氏体强化的机理

① 主要是固溶强化

② 亚结构强化

③ 时效强化

3. 片状马氏体的性能：高强、硬度，塑性韧性差。

板条状马氏体的性能：高强、硬度，良好的塑性韧性。

#### 四、马氏体的形成机理及转变特点

1. 以切变的方式进行

2. 转变特点

① 铁碳原子不扩散，非扩散型转变

②  $M$  的成分与原  $\gamma$  的相同





- ③ $\gamma$  转变为  $M$  是在连续冷却下形成的
- ④通常  $M$  转变进行不完全，有残余  $\gamma$  存在
- ⑤ $M$  与  $\gamma$  的比容不一样，转变时产生组织内应力
- ⑥转变速率很快，表面产生浮凸
- ⑦ $M$  通常在  $\gamma$  的一定晶面形成，该晶面称为惯习面，界面为共格界面
- ⑧ $M$  与  $\gamma$  存在一定的位向关系  

$$\{hkl\}_M || \{h'k'l'\}_\gamma <uvw>_M || <u'v'w'>_\gamma$$
- ⑨ $M_s$  和  $M_f$  随碳含量增加而降低
- ⑩ $\gamma$  的稳定化 P339

## 1-6 贝氏体的转变

贝氏体：碳过饱和的铁素体和碳化物的机械混合物

### 一、组织形态

#### 1. 上贝氏体 $B_s$ -350°C 之间

形状：羽毛状

成束分布在  $\alpha$  条间，存在短杆状的不连续的渗碳体

#### 2. 下贝氏体 350°C- $M_s$ 之间

形态：黑色的针状

在  $\alpha$  中分布着细片状的  $\epsilon$  碳化

#### 3. 粒状贝氏体

(1)

(2)



上贝氏体光学显微照片 500 倍



物

下贝氏体光学显微照片 500 倍

### 二、贝氏体的形成过程

### 三、贝氏体的性能

1. 贝<sub>上</sub>：强度低，塑性韧性低，脆性大。（不希望得到）
2. 贝<sub>下</sub>：优良的综合力学性能。（希望得到）采用等温淬火的工艺得到。

## 1-8 钢的退火和正火

### 一、钢的退火

退火：概念。

缓慢冷却：工业上一般指随炉冷却。

目的：P348

1. 魏氏组织：非共析钢加热温度较高，快冷时先共析相以针状或片状形式从晶界向内生长，将珠光体基体割裂，性能较差。



## 2.带状组织:

### 3.类型:

#### (1) 完全退火:

##### a.工艺曲线

##### b.退火后的组织: $\alpha + P$

##### c.应用

亚共析钢的铸、锻、轧件。

#### (2) 不完全退火

##### a.工艺曲线

##### b.退火后的组织:

##### c.应用:

对于亚共析钢原始组织中,  $\alpha$  先的晶粒细小,  $P$  片层间距小。退火的目的是为了增大  $P$  的片层间距。

对于过共析钢片状  $P$  能满足要求。

#### (3) 等温退火

可代替 (1) (2), 得到均匀组织, 节约时间。

##### a.工艺曲线

##### b.应用:

与之前两者相同。

#### \* (4) 球化退火

##### a.应用:

共析钢 (碳钢、合金钢) 和过共析钢 (工具钢)

##### b.目的:

得到粒状珠光体, 一方面降低硬度, 便于切削加工, 另一方面为随后淬火做好组织准备。

#### (5) 扩散退火: 消除成分不均匀, 枝晶偏析。

#### (6) 低温退火 (加热温度低于 $A_{c1}$ 保温)

##### a.软化退火: 降低钢锭 (坯) 的应力和硬化

##### b.去应力退火: 消除铸锻焊件的内应力, 加热温度: $500-650^{\circ}\text{C}$

##### c.再结晶退火

#### (7) 去氢退火

##### 1) 在钢的纵断面呈椭圆状的银色斑点

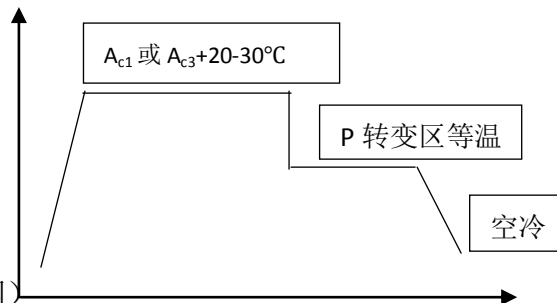
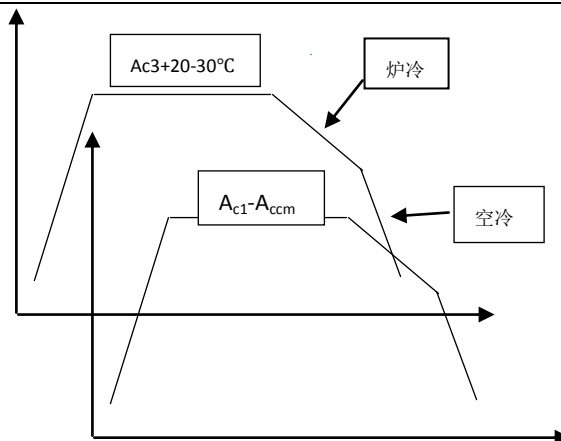
##### 2) 消除方法

a.减少  $H$  的来源 b.热处理 c.小件热锻轧后放入缓冷坑冷却到  $200^{\circ}\text{C}$  左右取出

##### 4) 工艺

碳钢和低合金钢:

中合金钢:



## 二、钢的正火 (常化)

### 1.正火的目的: P352

低碳钢-正火; 中碳钢-正火退火皆可; 高碳钢-先正火, 除网, 再球化退火。

### 2.工艺特点



- (1) 合金钢的加热温度要高。
  - (2) 大断面工件冷却时可吹风、喷雾。
  - (3) 过冷奥氏体稳定性不同，可得到组织 S、B、M+A<sub>残</sub>
  - (4) 过冷奥氏体稳定性大的钢正火后再进行一次高温回火
- 0.6-1.4 C 钢：正火后组织索氏体
- <0.6 C 钢：α+S

### 三、各种退火和正火的加热温度

P348 图 12-58

12-9 钢的淬火和回火

#### 一、淬火的目的是和加热温度

1. 淬火：将钢加热到  $A_{c1}$  或  $A_{c3}$  以上温度，保温一段时间，然后在水或油等冷却介质中快速冷却的热处理工艺。

2. 目的：得到 M 使钢强化

3. 淬火加热温度

确定加热温度的原则：防止奥氏体粗化，保证得到细小的 M 组织。

(1) 亚共析钢

加热温度： $A_{c3}+30-50^{\circ}\text{C}$

组织：细小的 M+少量  $\gamma_{\text{残}}$

(2) 过共析钢

加热温度： $A_{c1}+30-50^{\circ}\text{C}$

组织：细小的 M+粒状碳化物+ $\gamma_{\text{残}}$

(3) 共析钢

加热温度： $A_{c1}+30-50^{\circ}\text{C}$

组织：细小的 M+ $\gamma_{\text{残}}$

注：加热温度不能过高或者过低。

过高：

- 1、得到粒状碳化物。
- 2. 温度越高， $\gamma$  含碳量越高，残余奥氏体越多。
- 3. 温度越高晶粒越粗大。

(4) 合金钢的淬火温度

含有 Nb、V、Ti 强碳化物形成元素的合金钢淬火加热温度比碳钢高。

目的：使合金元素溶入中，增大稳定性；合金钢不易粗化，温度高可加快奥氏体化过程。

#### 二、淬火冷却介质（淬火剂）

难点：冷却速度大于临界冷却速率才能形成 M，但是，快冷时工件产生热应力， $\gamma \rightarrow \text{M}$  时产生组织应力，可使工件或者钢材变形、开裂。

1. 理想的淬火冷却过程（曲线）

650℃以上慢冷减少热应力





650-400℃之间快冷，避免非马氏体转变

400℃以下慢冷，减小组织应力

2.常用的淬火冷却介质

水，油

(1) 水盐水、碱水

主要用于尺寸小，形状简单的碳钢工件。

(2) 油 10、20、50 号机油

用于合金钢工件

(3) 熔融的盐或碱——盐浴或碱浴

用于分级淬火或等温淬火

### \*三、淬火的淬透性

(1) 淬透性及其影响因素

淬透性：奥氏体化的钢接受淬火的能力。

淬透（硬）层深度：钢表面至内部半马氏体区的深度。

与淬火介质、工件尺寸、临界冷却速度有关。

用一定条件下的淬透层深度表示。

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。临界速度下降，淬透性增加。

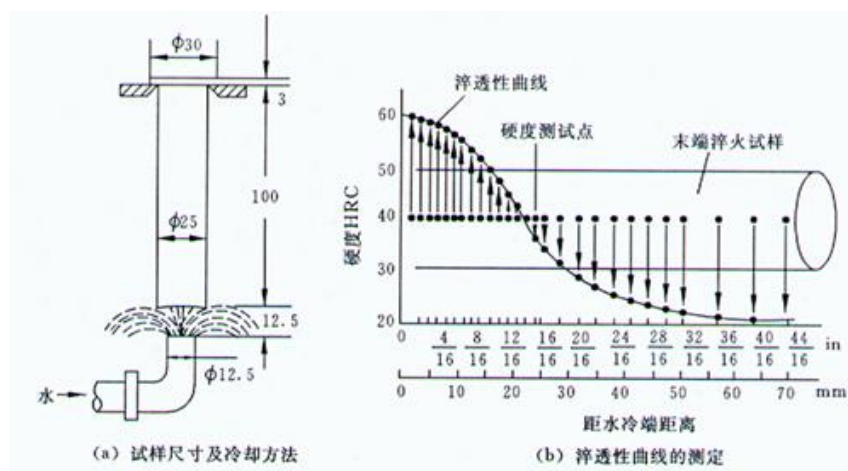
碳钢，共析钢淬透性好。合金元素除钴外，溶入奥氏体中的合金元素都提高淬透性。

淬硬性：

(2) 淬透性的测定方法

1) 工具钢——断口评级法

2) 结构钢——顶端淬火法





#### 四、常用的淬火方法

单液淬火、双液淬火、分级淬火、等温淬火（得到贝下），如图

#### \*五、钢的回火

回火：加热到低于  $A_1$  的某一温度，保温一段时间，然后冷却至室温的热处理工艺。

目的：1) 消除内应力 2) 稳定组织 3) 调节性能

1. 淬火钢在回火时的组织变化（看书仔细研究）

室温下组织： $M + \gamma_{残}$

随温度的升高发生如下变化

( $M + \gamma_{残}$ ) 亚稳态  $\rightarrow$  (加热，变化分五个阶段) ( $\alpha + Fe_3C$ ) 稳定组织

(1)  $<100^\circ C$  时， $M$  中  $C$  原子发生偏聚

(2)  $100-200^\circ C$  时， $M$  分解

$\alpha + \epsilon$  碳化物 ( $Fe_{2.4}C$ ，六方)  $\rightarrow$  回火马氏体 ( $M_{回}$ )

(3)  $200-300^\circ C$  时，残余奥氏体分解

$\alpha +$  薄片状  $\epsilon$  碳化物，即回火马氏体或  $B_{下}$

(4)  $250-400^\circ C$  时，碳化物转变

$\epsilon \rightarrow x (Fe_5C_2) \rightarrow \theta (Fe_3C)$ ，稳定性上升。

(5) 碳化物的聚集长大和  $\alpha$  相回复、再结晶

1)  $Fe_3C$  长大、球化

2)  $400^\circ C$  以上，发生  $\alpha$  相回复：内应力降低，位错密度下降，此时  $\alpha$  相仍是片状

3)  $400^\circ C$  以上， $\alpha$  发生再结晶，变为等轴  $\alpha$

2. 回火后的组织

(1) 回火马氏体

$150-250^\circ C$  回火， $\alpha + \epsilon$  碳化物

(2) 回火屈氏体

$350-500^\circ C$  回火，片状或条状  $\alpha$  分布着细小粒状的渗碳体

(3) 回火索氏体

$500-650^\circ C$  回火，等轴状的  $\alpha +$  粒状  $Fe_3C$

(4) 粒状珠光体

$650-A_1^\circ C$  回火，与球化退火组织一样

3. 淬火钢回火后力学性能变化

(1)  $-200^\circ C$ ：高硬度

(2)  $-400^\circ C$ ：高的强度极限

(3)  $-600^\circ C$ ：优良的综合力学性能。

4. 回火脆性

回火脆性：淬火钢回火后出现韧性下降的现象。

(1) 低温回火脆性

发生温度： $250-400^\circ C$

特点：几乎所有的钢都存在，不可逆。



防止方法：避开温度范围。

(2) 高温回火脆性

发生温度：450-650°C

产生原因：Sb、P、Sn、As 在原奥氏体晶界的偏聚

特点：可逆，快冷不出现，长时保温快冷也出现

防止方法：1) 小尺寸，快冷。2) 大尺寸，加入 W、Mo (<1%)

5. 回火稳定性：淬火钢回火时抵抗强度、硬度下降的能力。

6. 淬火回火后的组织与奥氏体直接分解的组织性能比较

淬火回火： $M_{回} T_{回} S_{回}$

直接： $B_{下} T \quad S$

硬度相等时，回火组织韧性好。

7. 回火工艺

(1) 低温回火 (~200°C)

组织： $M_{回}$

性能：高硬度，耐磨性

应用：轴承钢、工具钢（低碳钢不行）

(2) 中温回火 (~400°C)

组织： $T_{回}$

性能：高的弹性性能

应用：各种弹簧钢的热处理

(3) 高温回火 (~600°C)

组织： $S_{回}$

性能：优良的综合力学性能

应用：轴类零件

(4) 调质处理：淬火+高温回火

## 1-10 形变热处理

优点：1) 获得更好的性能 2) 简化生产工艺流程

### 一、高温形变热处理

1. 工艺：在接近  $A_{c3}$  以上的温度变形，变形后立即淬火并回火的工艺。

2. 优缺点：变形温度高易变形，但强化效果差。

3. 具体形式：控制轧制过程中，控制轧制温度、道次、变形量、道次间隙时间、轧后空冷

适用：含有 V、Ti、Nb 的合金钢

### 二、低温形变热处理

1. 工艺

2. 优缺点：变形抗力大，要求高功率设备。

3. 适用：有双 C 曲线的合金钢



## 1-11 钢的表面淬火

### 一、目的和方法

- 1.目的：是钢材表面强化，使不具有良好的韧性。
- 2.方法：感应加热
- 3.适用钢种：中碳钢和合金钢

### 二、感应加热表面淬火

- 1.原理：电磁感应原理，电流频率越高，透入深度越小，加热层越薄。
- 2.特点：

### 三、感应加热的种类和淬透层深度

- 1.高频：1-2mm，小模数齿轮和小轴
- 2.中频：3-5mm，大模数齿轮，大轴，钢轨
- 3.工频：10-15mm，大工件
- 4.表面淬火前的预先热处理：正火或调质处理

## 1-12 钢的化学热处理

目的：通过改变工件表面的成分，改变工件表面的性能。

### 一、渗碳

- 1.工艺：活性炭，900-950℃
- 2.目的：
- 3.应用：受大冲击载荷、交变载荷低碳钢和低碳合金钢
- 4.种类：
  - (1) 气体渗碳
    - 1) 渗碳剂
    - 2) 优点：效率高，工作条件好，渗碳过程易控制，得到工件质量好。
  - (2) 固体渗碳
    - 1) 渗碳剂：木炭
    - 2) 优缺点：设备简单，效率低，条件差，不易控制，基本淘汰
  - (3) 液体渗碳  
渗碳剂：NaCN、KCN
- 5.渗碳层的成分、组织及厚度
  - (1) 渗碳层的成分  
0.85~1.05%
  - (2) 组织（缓冷）





表层：过共析钢， $P+Fe_3C_{II}$ （网状）

过渡层：共析钢， $P$

内部：亚共析钢， $\alpha+P$

（3）渗碳层厚度（从表面到渗碳层中心的距离）

0.5~2mm

6.渗碳后的热处理

（1）淬火+低温回火

本质细晶粒钢预冷后直接淬火

本质粗晶粒钢渗碳冷至室温后再加热淬火

（2）组织

表层：高碳细片状  $M_{回}+碳化物+\gamma_{残}$ （少量）

心部：碳钢（ $\alpha+P$ ），合金钢（低碳  $M_{回}+\alpha$ ）



## 二、氮化（渗氮）

1.工艺： $NH_3$ ，500-580°C

2.适用的钢种：含有氮化物形成元素的钢（Cr、Mo、Al）

例：38CrMoAl，精密机床主轴

3.氮化前的热处理：调质处理

4.优点：硬度，耐磨性高，疲劳强度提高，耐磨性好，零件变形小，处理温度低，但时间长。

5.应用：高精度的齿轮和轴

## 三、碳氮共渗（氰化）

# 2 合金钢总论

## 2-1 合金元素在钢中的作用

### 一、常用的合金元素及分类

1.常用的合金元素

2.分类

（1）按合金元素与钢中碳的作用

1) 非碳化物形成元素 Ni、Co、Si、Al、Cu

2) 碳化物形成元素

Ti、Zr、V、Ta、Nb      W、Mo      Cr、Mn      Fe

强碳化物形成元素中弱

特殊碳化物：





合金渗碳体  $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ 、 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$

(2) 按合金元素对  $\gamma$  相区的影响分类 (P368 图 13-1)

1) 扩大  $\gamma$  相的元素

Mn、Co、Ni、Cu、N、C

2) 缩小  $\gamma$  相区的元素

V、Cr、Ti、W

## \*二、合金元素在钢中的作用

1. 形成合金铁素体和奥氏体 (产生固溶强化)

2. 形成稳定性硬度更高的合金碳化物——强化相

TiC、NbC、VC、WC 等, 不易长大, 细小均匀分布。

3. 形成氮化物——提高强度

TiN、VN、NbN、AlN (AlN 可细化组织)

4. 扩大  $\gamma$  相元素

Mn 和 Ni 含量高的合金钢, 使钢在室温下仍为单相的  $\gamma$  (奥氏体钢, 如 ZGMn13, 奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9)

5. 缩小  $\gamma$  相元素 (Cr): 可使钢从高温到室温都是单相铁素体——铁素体钢。

如: 铁素体不锈钢 1Cr17

6. 改变 S、E 点的成分和 A<sub>1</sub> 的温度

(1) S 点、E 点左移

如: 3Cr2W8V (过共析钢, C: 0.3-0.4%)

W18Cr4V (C: 0.7-0.8%) 有莱氏体——称莱氏体钢。

(2) A<sub>1</sub> 的影响

Ni、Mn 使 A<sub>1</sub> 温度下降。

7. 对奥氏体化的影响

(1) 奥氏体的形成速度

(2) 合金元素扩散速率慢

8. 对过冷奥氏体转变的影响

(1) 使 C 曲线位置改变——提高淬透性

(2) 使 C 曲线变为双 C 曲线

(3) 合金钢中贝氏体转变进行不完全

(4) 对 M 转变的影响

9. 对回火转变的影响

(1) 提高钢的回火稳定性 (回火抗力)

回火稳定性: 淬火钢回火时随温度升高抵抗硬度下降的能力。

(2) 回火脆性

Mo 或 W 防止高温回火脆性

(3) 产生二次硬化: 某些合金钢在 500-600°C 回火, 硬度不但下降反而上升的现象。(高温回火时析出合金碳化物)

(4) 产生二次淬火: 某些合金钢淬火后残余奥氏体很稳定, 在 500-600°C 回火后不分解, 冷却过程中发生马氏体转变的现象。

10. 对钢性能的影响



(1) 对力学性能的影响

(2) 对工艺性能的影响

1) 焊接性能: S、P、C 降低焊接性能; Ti、V、Zr、Nb 提高焊接性能。

2) 切削加工性能: 可加 S、P、Pb

3) 铸造性能

## 2-3 钢的分类及编号

分类: 非合金钢、低合金钢、合金钢

### 一、碳素钢的牌号

#### 1. 结构钢

(1) 碳素结构钢

Q195: Q 代表屈服强度。其他的如 Q235、Q255 等, 主要用于建筑。

(2) 优质碳素结构钢 (P、S 含量低)

20、45、60 钢 (含碳量的万分之。。。!!!)

#### 2. 工具钢

T XX      T: 碳 XX: 含碳量千分之。。。如: T8、T10、T13

### 二、合金钢的编号

\*1. 低合金 (不超过 3%) 钢强度钢:

Q295、Q345、Q390

12Mn、09MnV、16Mn、16MnVTi (Mn 钢在中国使用较多, 因为 Mn 矿储量较多)

#### 2. 合金结构钢

60Si2Mn: 含碳量万分之 60, 含 Si 量 2%, Mn 小于 0.5%, 其他: 50CrV、50CrVA  
(A 代表高级优质钢)

#### 3. 合金工具钢 (C 超过 1% 不标)

9Cr2: C 含量千分之 9, Cr2%, 合金元素低于 1.5% 不标

其他: CrWMn、9Mn2V

特殊: 只有 Cr 低 Cr 的, 则为 Cr06: 0.6%Cr

#### 4. 高速工具钢

W18Cr4V (0.7-0.8%C)      1841 高速工具钢

W6Mo5Cr4V2 (0.8-0.9%)      6542 高速工具钢

#### 5. 轴承钢

GCr15 (Cr 千分之十五, 只有这里!!!)

GCr15SiMn

#### 6. 不锈钢耐酸钢

1Cr18Ni9Ti (含碳量千分之一)

0Cr18Ni9Ti (含碳量小于千分之一)

第十四章 结构钢



## 2-4 机器结构钢

### 一、对性能的要求

- 1.破坏类型 P382
- 2.性能要求

### 二、淬透性

### 三、强韧钢（调质钢、低碳马氏体钢）

#### 1.调质钢

- （1）常见钢号：40、45、40Cr、40CrNiMo、40CrMnMo、35SiMn
- （2）含碳量及合金元素作用

##### 1) 0.4%C 左右

##### 2) 合金元素 Mn、Si、Cr、Mo、B

##### 3) 热处理组织

淬火+高回， $S_{\text{回}}$

#### 2.低碳马氏体钢

- （1）常用钢号：

20MnVB、18Cr2Ni4WA

- （2）热处理

淬火+低回回火低碳马氏体

### 四、渗碳钢

#### 1.常用钢号：20、20MnVB、20CrMnTi、12CrNi3A

#### 2.含碳量及合金元素

- （1）成分：0.15-0.3%C
- （2）合金元素：Cr、Ni、Mn、B（提高淬透性）
- （3）对渗碳性能的要求 P385
- （4）热处理：渗碳+淬火+低回

### 五、弹簧钢

#### 1.性能要求：高强度、弹性极限，高抗疲劳强度。

#### 2.含碳量及合金元素：

- （1）含碳量：0.5-1.2%

- （2）合金元素：

##### 1) Cr、Mn、B 提高淬透性

##### 2) Si——提高弹性极限

##### 3) V——细化奥氏体晶粒

#### 3.常用弹簧钢

60Si2Mn——汽车板簧



50CrVA——气门/活塞弹簧

#### 4.热处理

(1) 热轧态的钢料

1) 热成型后直接淬火+中回 (高温形变热处理)  $T_{回}$

2) 一般的淬火+中回

(2) 冷拔冷轧态的钢料

低温加热 (180-370°C)

(3) 退火态的钢料

成型后淬火+中回

## 2-5 超强韧钢

### 一、超强韧钢及类型

1.概念: P385

2.种类: 低合金、高合金

### 二、马氏体时效钢

1.概念: P391

2.特点:

(1) 不是靠碳强化为主要强化元素, 是靠析出金属间化合物细小均匀分布强化。

(2) 空冷可得到马氏体。

(3) 硬度非常低 (HRC20), 便于加工, 焊接性能好。

3.钢号: 18Ni、20Ni、25Ni

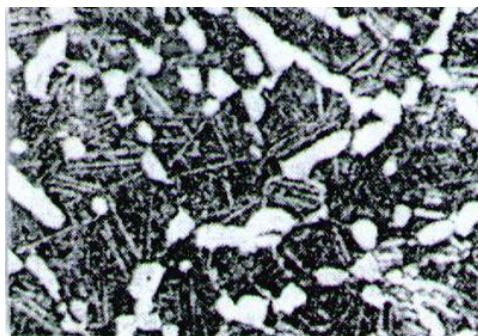
4.热处理:

(1) 固溶处理 (淬火)

组织: 合金元素过饱和的微碳板条马氏体。

(2) 时效处理 500°C×3-6h

组织: 细小的金属间化合物+ $\alpha$  相基体



## 2-6 工程结构钢

### 一、合金化

1.工程结构钢的类型

Q235、Q345 (16Mn)

2.合金元素对强度的影响

Si、Mn——固溶强化

V、Nb、Ti——细化晶粒

3.合金元素对焊接性能的影响

(1) 低碳



(2) 合金元素影响焊接性能

#### 4. 低温韧性和低温用钢

(1) 低温韧性

(2) 低温脆性的评价

脆性转折温度

(3) 影响脆性转变温度的因素

化学成分: 随碳含量的增加, 脆性转变温度增加, 故用低碳钢;  $P \uparrow T \uparrow$ ;  $Ni, Mn \uparrow T \downarrow$ 。

(4) 低温用钢

16Mn、09Mn2V、09MnTiCuRE

## 二、工程结构钢的控轧控冷（高温形变热处理）

1. 目的: 提高强度、韧性

高密度位错的细小  $\alpha$  和弥散析出的碳化物 ( $NbC$ 、 $TiC$ )

2. 控轧理论效果的关键

(1) 含有微量的  $Nb$ 、 $Ti$ 、 $V$  的微合金化的钢;

(2) 获得细小并且含有位错的奥氏体;

(3) 控制冷却速度。

## 2-7 轴承钢

### 一、工作条件及对性能的要求

1. 受力的接触面积小, 受交变应力, 接触的疲劳破坏, 轴承或滚珠出现麻点;

2. 高的抗压强度, 高耐磨性, 高的接触疲劳强度, 尺寸稳定, ! 高的冶金质量。

### 二、合金化

1. 轴承钢的种类

\*GCr15 (Cr: 1.5%) 高碳低铬轴承钢

其他: GSiMnV G18Cr2Ni4V

2. 合金元素的作用

含碳量: 1% (高碳, 高硬度和疲劳强度)

Cr: 提高淬透性、耐磨性

Si: 提高弹性极限

Mn: 提高淬透性

### 三、夹杂物的种类

1.

1) 种类: 氧化物、氮化物、硫化物、硅酸盐

有害作用: 由左至右降低

2. 减少夹杂物的方法

1) 冶炼过程中

2) 加工方法





#### 四、轴承钢种的碳化物

##### 1.液析碳化物

- 1) 组织形态：粗大的块状
- 2) 形成原因：严重的枝晶偏析（非平衡结晶）
- 3) 影响：使用时易剥落，降低耐磨性
- 4) 消除办法：扩散退火

##### 2.带状碳化物（二次碳化物）

- 1) 组织：带状
- 2) 形成原因：由于不严重偏析析出二次碳化物，沿轧制方向伸展
- 3) 影响：使钢中的碳化物不均匀分布，颗粒较大，使用寿命减小
- 4) 消除办法：扩散退火

##### 3.网状碳化物

- 1) 组织：粒状
- 2) 形成原因：球化退火

#### 五、成品热处理

##### 1.轴承的生产流程

轧制或锻造——球化退火——机加工——淬火回火——磨削加工——成品

##### 2.成品热处理

###### 1) 目的

###### 2) 热处理工艺：淬火+低回

(1) 淬火温度： $A_{c1}-A_{cm}$

(2) 淬火后组织：

(3) 回火温度： $150^{\circ}\text{C}\times 2\text{h}$

(4) 回火后的组织： $M_{\text{回}}+\text{粒 } C+\text{少量 } \gamma_{\text{残}}$

3) 用途：主要用来制造滚动轴承的滚动体（滚珠、滚柱、滚针）、内外套圈等，属专用结构钢。从化学成分上看它属于工具钢，所以也用于制造精密量具、冷冲模、机床丝杠等耐磨件。

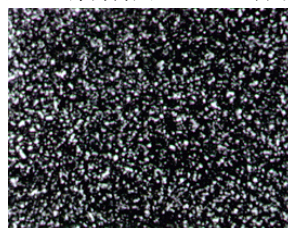
#### 第十六章工具钢

##### 16-1 工作条件及对性能要求

刀具：热硬性。（在高温仍具有高硬度）

量具：尺寸稳定性（组织稳定性）例如：奥氏体转变马氏体要膨胀。

模具：



## 2-8 刀具钢与量具钢

### 一、钢种：碳工钢、低合金工具钢

T8-T13 ( $<200^{\circ}\text{C}$ )     9CrSi、9Mn2V、CrWMn( $<250^{\circ}\text{C}$ )

### 2.含碳量及合金元素

(1) 含碳量：高碳钢 0.75-1.5%

(2) 合金元素：



V、W、Cr——增大耐磨性，细化组织

Si: 提高回火抗力

### 3.热处理

(1) 球化退火

(2) 淬火+低温回火:  $M_{回}$ +粒状碳化物

### \*\*高速钢

特点: 高的热硬性。

高碳钢 (0.6-1.6%), 合金元素含量高 (>10%)

种类: 钨系——W18Cr4V

钨钼系——W6Mo5Cr4V2

#### 1.合金元素及合金相

(1) 合金元素及作用:

1) 高碳: 提高马氏体硬度

2) W、Mo: W 形成碳化物, 产生二次硬化, 获得高的热硬性

3) Cr: 提高淬透性 (淬火时 Cr 溶入  $\gamma$ )

4) V: 提高耐磨性 (碳化钒硬度高且细小分布)

5) Co: 提高热硬性、耐磨性

(2) 合金相

1) 合金元素高的  $\alpha$  和  $\gamma$

2) 各种碳化物 (M 代表某种金属元素)

MC 型: VC

$M_2C$  型:  $W_2C$ 、 $Mo_2C$

$M_6C$  型:  $Fe_3W_3C$   $M_{23}C_6$  型:  $Cr_{23}C_6$

#### 2.高速钢铸态组织

莱氏体钢:

组织: 粗大的共晶莱氏体 (共晶碳化物呈鱼骨状) + 共析体 +  $M + \gamma_{残}$

注: 粗大的共晶碳化物用热处理的无法改善

#### 3.改善碳化物不均匀的方法

(1) 降低浇注温度 (1470-1490°C)

(2) 通过锻造改善碳化物的不均匀性

#### 4.高速钢的热处理

(1) 退火: S+破碎的共晶碳化物+少量先共析细小碳化物

(2) 成品热处理: 淬火+回火

1) 淬火:

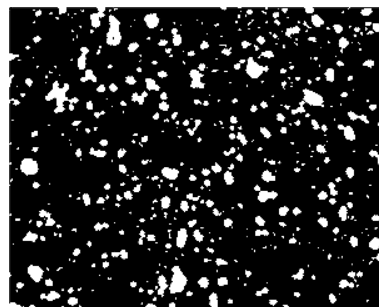
加热温度高 (>1200°C)

淬火时要预热 (含合金元素高, 导热性差), 分段加热。

分级淬火。

2) 回火: 560°C多次回火。(一般三次)

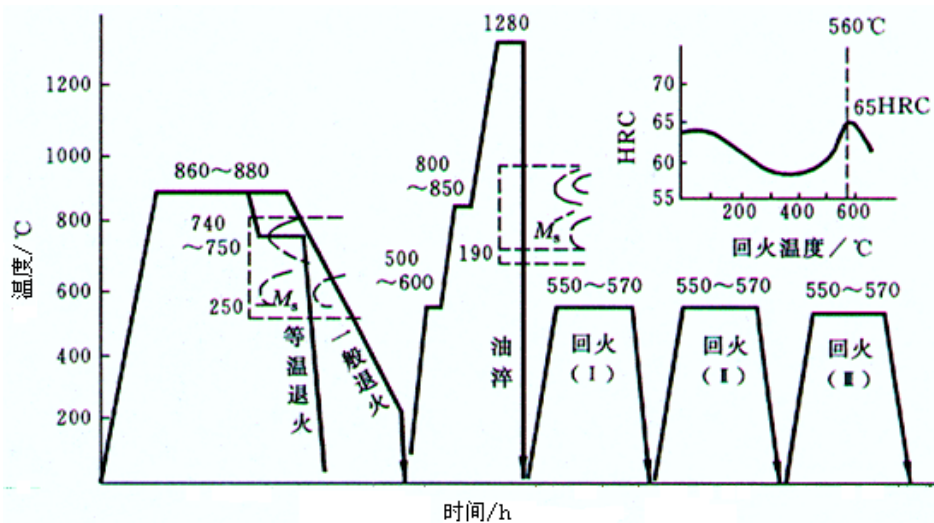
560°C回火的原因: 500°C以上时, W、Mo 碳化物析出, 得到回火马氏体, 相当于碳钢 200°C回火!





多次回火的原因：降低残余奥氏体的量

$M_{\text{回}} + \text{碳化物} + \text{少量 } \gamma_{\text{残}}$



5.用途：制造高速切削用车刀、刨刀、钻头、铣刀等。

### 16-3 模具钢

#### 一、冷作模具钢

##### 1.钢种：

碳工钢：T10 T13

低合金工具钢：9CrSi、9Mn2V

Cr12 型模具钢：Cr12、Cr12MoV

##### 2. Cr12 型冷作模具钢

(1) 成分：C>1.5%;Cr: 12%，提高淬透性，回火稳定性；Mo: <1%，提高淬透性，产生二次硬化；V: <1%，细化晶粒，提高耐磨性。

(2) 锻造与退火（莱氏体钢）

1) 锻造：破坏共晶碳化物

2) 球化退火

(3) 成品热处理

淬火+低回，组织： $M_{\text{回}} + \text{碳化物}$ （未溶碳化物+二次碳化物）+ $\gamma_{\text{残}}$

#### 二、热作模具钢

##### 1.高韧性热作模具钢（热锻模）

(1) 钢号：5CrNiMo 5CrMnMo

Ni:提高淬透性；Mn: 提高韧性，淬透性，替代 Ni

(2) 热处理：淬火+中/高回

##### 2.高热强性热作模具钢（压铸模、热挤压模）

压铸模：3Cr2W8V

热挤压模：4Cr5MoVSi (H11) 4Cr5MoV1Si (H13)

### 16-4 高锰钢——耐磨钢

#### 一、特征及用途

##### 1.特征：



- 1) 高的加工硬化速率
- 2) 单相的奥氏体组织（韧性高）——不易裂
- 3) 无磁
- 4) 屈服强度、抗拉强度比小——不能做尺寸要求高的工件

## 2.用途

受到大的压力、冲击力和摩擦力的工件。

## 二、成分

碳: 0.9-1.5%; Mn: 10-14%, 获得单相奥氏体, 增加钢的加工硬化速率。 $C/Mn=0.1$ 较合适。

## 三、牌号

ZGMn13-1/-2/-3/-4, 随序号的增加, 强度韧性增加。

## 四、铸态组织及热处理

### 1.铸态组织

奥氏体+碳化物

### 2.热处理

#### (1) 目的

\* (2) 热处理工艺:

水韧处理: 将高锰钢铸件加热到  $1050^{\circ}\text{C}$ , 保温使碳化物溶解, 然后加入水中冷却, 得到单相奥氏体的工艺。

## 第十七章 不锈钢

### 17-1 金属材料的耐蚀性

#### 一、腐蚀的基本类型

##### 1.均匀腐蚀

##### 2.晶间腐蚀

##### 3.点腐蚀:

##### 4.应力腐蚀: 在盈利和介质共同作用下产生的腐蚀破坏。

#### 二、提高材料耐蚀性的途径

##### 1.尽量减少成分组织的不均匀性

##### 2.提高金属基体的电极电位。(Cr、Ni、Si)

##### 3.表面形成致密的氧化膜

#### 三、碳及合金元素在钢中的作用

##### 1.Cr: 提高耐蚀性

(1) 形成致密的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ;

(2) 当 Cr 含量大于 12%时, 可形成单相铁素体;

(3) 提高铁基体的电极电位 ( $\frac{8}{N}$  规律)

##### 2.Ni

(1) 可获得单相奥氏体

(2) 提高电极电位 ( $\frac{8}{N}$  规律)

##### 3Mn 和 N

(1) 代替 Ni



## (2) 提高有机酸中的耐蚀性

### 4.Ti 和 Nb

形成碳化物，减轻晶间腐蚀作用

### 17-2 不锈钢耐酸钢

马氏体不锈钢：1Cr13、2Cr13、3Cr13、4Cr13、9Cr18

铁素体不锈钢：1Cr17Ti、1Cr28、1Cr17

奥氏体不锈钢：1Cr18Ni9、1Cr18Ni9Ti

奥氏体-铁素体双相不锈钢：0Cr21Ni5Ti

沉淀硬化型不锈钢：0Cr17Ni7Al

#### 一、马氏体不锈钢

1.常用牌号如上。

2.性能：不可焊接

3.用途：1/2Cr13 汽轮机叶片等；3/4Cr13 刀具

3.热处理：淬火+回火

#### 二、铁素体不锈钢

1.常用牌号如上。

2.性能：抗氧化性强、耐酸能力强，塑性好，强度低，不能热处理强化，可焊接。

3.用途：：电子电器、五金冲压件、弹簧弹片、垫膜片、精密零部件等。

4.存在问题：易产生脆性。

#### 三、奥氏体不锈钢（用量最大）

1.常见牌号如上。

2.性能：切削加工性能差，应力腐蚀倾向大，焊接性能好。

3.用途：化工工业容器和设备，医疗设备，抗磁仪表。

4.热处理：固溶处理

（1）固溶处理：加热到 1100℃保温，让碳化物溶入奥氏体，然后快冷，得到单相奥氏体的热处理工艺。

（2）去应力退火

冷加工：300-350℃；焊接：850℃—

（3）稳定化处理：加热到高温，使 Cr 的碳化物溶入奥氏体，使之形成 Ti、Nb 的碳化物。（850-880℃,6h）

## 铸铁

### 11-1 概述

铸铁：含碳量大于 2.11%，高碳、高硅杂质较多的铸造合金。

铸铁的性能与其中碳的存在形式有关。

#### 一、碳在铸铁中的存在形式及分类

##### 1.碳的存在形式：

（1）溶入  $\alpha$ -Fe、 $\gamma$ -Fe，固溶

（2）碳化物形式

（3）石墨：片状、团絮状、球状、蠕虫状

##### 2.分类 P303

#### 二、铸铁的石墨化及影响因素

##### 1.铸铁的石墨化





---

石墨可以从液体结晶而来，也可由  $\text{Fe}_3\text{C}$  分解出来。

1)  $\text{L} \rightarrow \text{G}$  (石墨)  $\text{L} \rightarrow \gamma + \text{G}'$

2)  $\gamma \rightarrow \text{G}_{\text{II}}$   $\gamma \rightarrow \alpha + \text{G}$

控制 2) 阶段，得到所需组织。

2. 影响石墨化的因素

(1) 成分: Mn、Si、C 促进，S 阻碍。

(2) 冷却速度

11-2 灰口铸铁

HT100: 灰铁，最低抗拉 100Mpa

组织: 片状石墨+基体 (P,  $\alpha$ ,  $\alpha + \text{P}$ )

11-3 可锻铸铁

不能进行锻造加工，石墨呈现团絮状。

先铸白口铁，再石墨化处理（一般做薄件）

11-4 球墨铸铁

球化处理+孕育处理

QT400-18 屈服比高，可代替钢

钢可进行的热处理球墨铸铁均可。

11-5 蠕墨铸铁

蠕化处理+孕育处理 RuT420

用途: 热循环条件工作，如汽缸盖、刹车片。