

注：部分图片来源于上课用的课本和PPT，如果侵权请联系[fugingchen@whut.edu.cn](mailto:fugingchen@whut.edu.cn)，我会及时替换掉

上篇为 **工程材料导论、铸造**；下篇为 **金属压力加工、焊接**

2018©Fu\_Qingchen, Markdown, Latex

# 金属材料的主要性能

## 力学性能

主要有5个力学性能：强度、塑性、硬度、冲击韧度、疲劳强度

### 强度

指材料在外力作用下抵抗 变形和断裂 的能力

在 **静拉伸试验** 中测定

- 弹性极限  $\sigma_e$
- 屈服极限  $\sigma_s$ ：此时曲线比较平缓，无需增大外力即可产生变形
- 强度极限  $\sigma_b$ ：超过强度极限后，会发生紧缩现象，并断裂

### 塑性

指材料在外力作用下产生塑性变形而不破坏的能力

在 **静拉伸试验** 中测定

- 伸长率  $\delta = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\%$
- 断面收缩率  $\Psi = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\%$

### 硬度

金属材料受压时抵抗局部变形，特别是塑性变形、压痕的能力。即抵抗外力压入其中的能力。

- 布氏硬度  $HBS = \frac{P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$ （P：加载力；D：压头直径；d压痕直径）。其实就是 载荷/表面积
  - 测量方法：将一定质量的球体在一定载荷作用压入试验表面一段时间，测量压痕得出
  - 优缺点：准确性高当对金属伤害大
  - 取值为8~650HBW
- 洛氏硬度  $HRC$ 
  - 测量方法：用120°锥角金刚石压头，先后施加预载荷和总载荷（预载荷+主载荷），随后撤去主载荷，测量压痕深度。
  - 优缺点：简单方便，可用于成品，但精度不高
  - 一般高速钢的硬度在62~66HRC

换算关系： $HRC = 52.76 - \sqrt{(103500000 - 218600HB)/HB^2}$

### 冲击韧度

材料在冲击载荷作用下抵抗变形和断裂的能力

冲击韧度： $a_k$ ，数值越高，韧性越好

## 疲劳强度

材料在交变应力作用下，在远远小于强度极限下发生断裂，而且没有任何征兆

材料经过无数次应力循环测验而不发生疲劳破坏的最高应力值

## 物理化学及工艺性能

不重要，略

## [MOOC]问答

- 在做材料的拉伸试验时是否一定要做成标准试样？为什么？

需要做成标准试样。要得到符合标准的强度、塑性指标，就一定要**控制变量**，即试样的长度，截面形状，直径等。不同规格材料受到试验机的拉伸作用，其受力状况不同，这样测出来的数据也就没有意义。

- 材料刚度与（ ）有关

弹性模量

## 铁碳合金

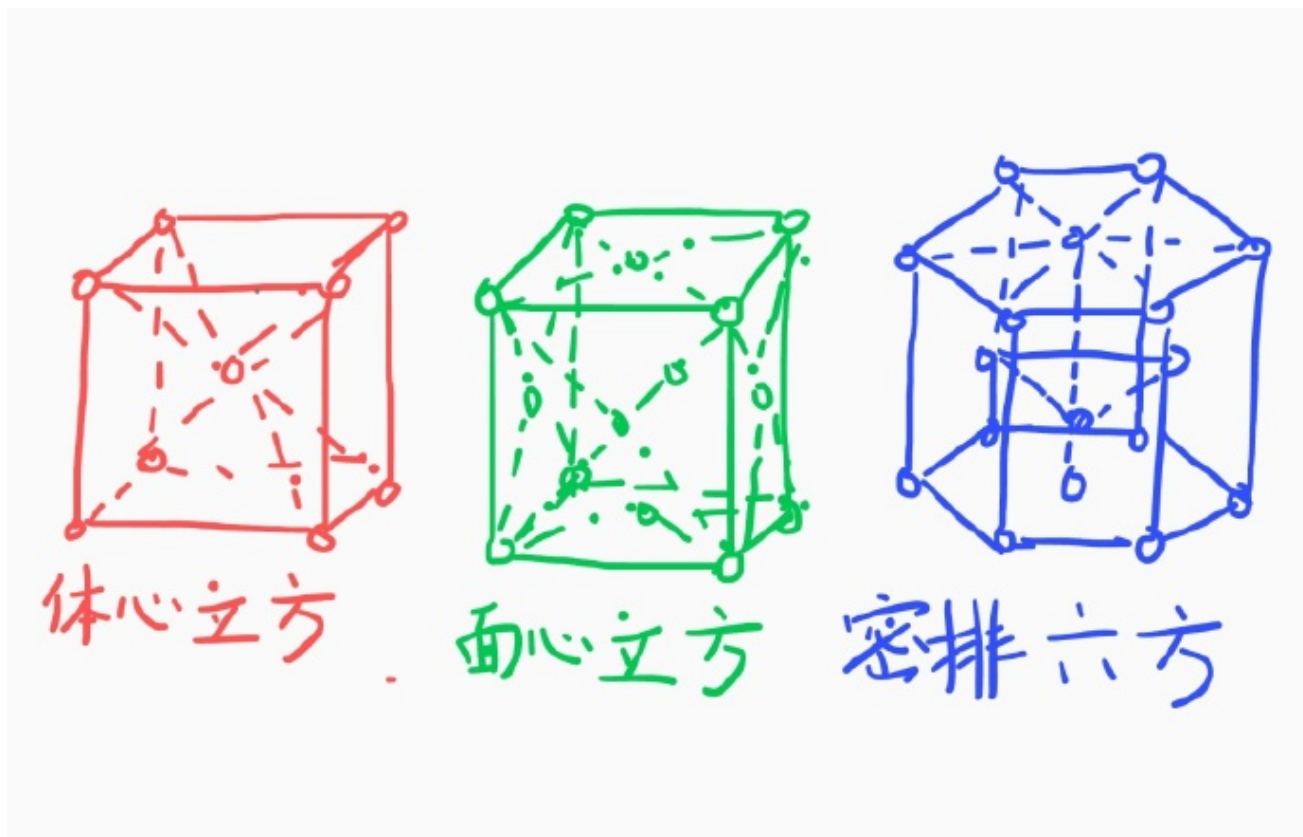
## 金属及合金的晶体结构

### 晶体结构

金属主要有三种晶体结构

晶体类型	体心立方晶胞	面心立方晶胞	密排六方晶胞
所含原子数	$8 \times 1/8 + 1 = 2$	$8 \times 1/8 + 6 \times 1/2 = 4$	$12 \times 1/6 + 2 \times 1/2 + 3 = 6$
常见物质	$\alpha - Fe, \delta - Fe, Ti \dots$	$\beta - Fe, Cu, Ag, Au, Pt \dots$	$Mg, Zn \dots$

其中，对应的晶胞示意图如下

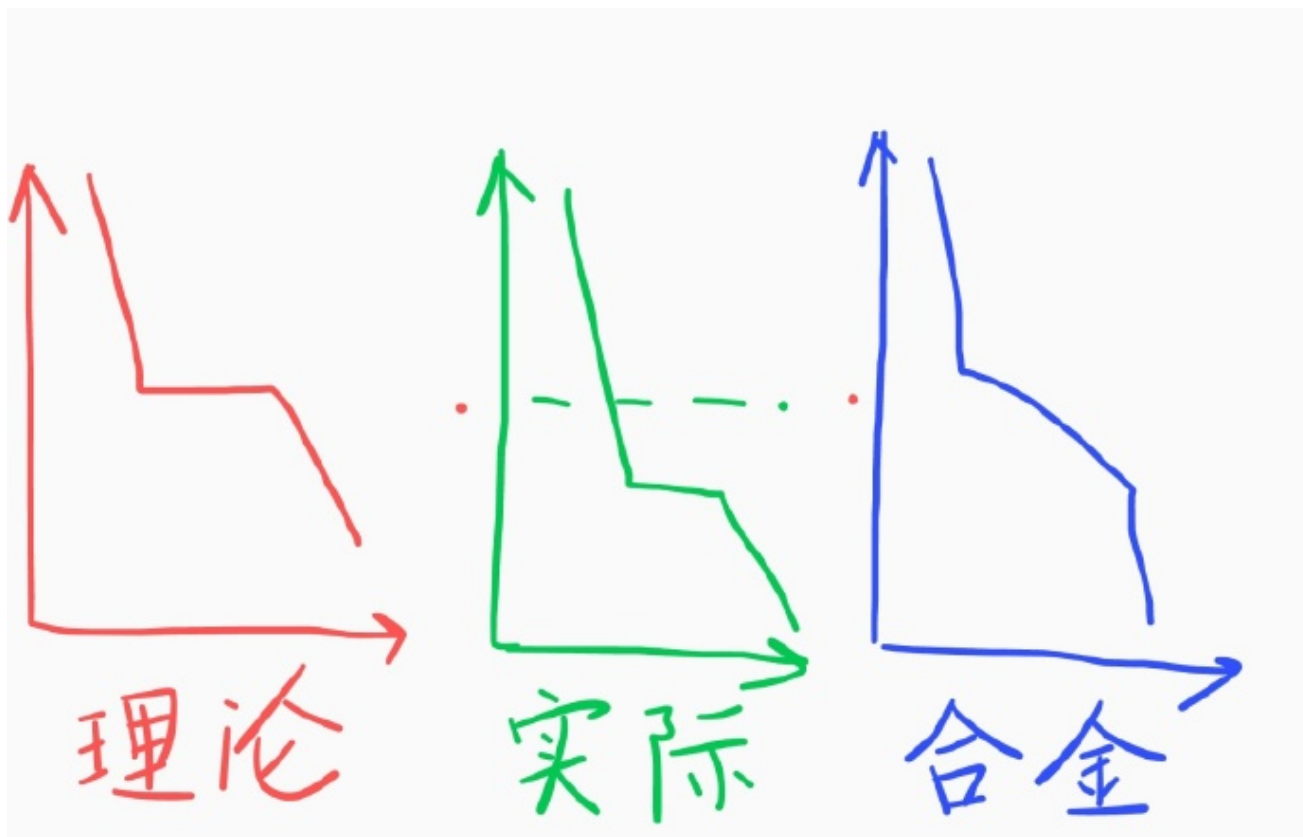


## 金属的结晶

随着温度的降低，金属的结晶有以下几个过程：

原子团→形核（有自发的也有外来的）→晶核长大（变为树枝状）→小晶粒→晶粒

**固态向液态转变过程中，会放出结晶潜热，会使冷却曲线出现一段水平段**，如下图（理论）横坐标为时间，纵坐标为温度。在实际上，由于金属有过冷度，因此曲线会下降一部分，如图（实际）。加入其它元素的合金，由于其他元素的影响将不会是直线，而是水平线，如图（合金）。然后可以看出 **合金的结晶是在一个范围内完成的**



晶粒粗细对材料力学性能具有很大的影响：**对同一金属，晶粒越细，其强度、硬度越高；同时塑性和韧性越好**

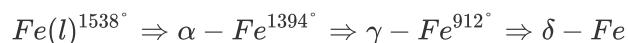
这是因为晶粒越小，晶界表面积越大，晶界越曲折，晶体的变形抗力也就越大，强度硬度也就越高。同时由于晶粒小，晶粒受力比较分散，每个单独的晶粒受力小，塑性变形也就越分散越均匀，因此塑性韧性高。

因此，在工程上，晶粒越小越好，下面有一些细化晶粒的措施：

- **提高冷却速度**，增加过冷度，从而增加晶核数量
- 在金属浇筑之前，向金属液**加入变质剂或孕育剂**，引入外来晶核，增加晶核数量
- 在金属凝固过程中采用机械**振动**、超声波振动、电磁**搅拌**等将长大的树枝状晶核打断，变小
- **热处理或塑性加工**，使晶粒变小

随着温度的降低，金属在**固态**下随着温度的变化，会有一种晶格转化为另一种晶格，这种现象就是**同素异构转变**

对于纯铁来说，会有以下转变



Fe 会从**体心立方晶胞**变为**面心立方晶胞**最后再变为**体心立方晶胞**。晶体结构发生变化，与晶体的结晶比较类似，也会释放出潜热，在图上出现水平台阶，因此**金属的同素异构体的转变**也叫做**重结晶、二次结晶**

## 铁碳合金的晶体结构

按照 Fe 与 C 的作用形式的不同，铁碳合金的组织可以分为**固溶体**、**金属化合物**、**机械混合物** 三种类型。

### 固溶体

合金组元通过溶解形成一种成分和性能均匀，且结构与组员之一相同的固相称为**固溶体**。根据溶质原子在溶剂晶格中的位置，可以分为 **替换固溶体**和**间隙固溶体**（原子半径相差小的就是替换固溶体...）。由于溶剂分子的加入，晶格会发生畸变，导致材料强度硬度升高。

## 铁素体 (F)

C 溶解在  $\alpha - Fe$  中形成的 **间隙固溶体**，通常用符号 **F** 表示

F 溶 C 极少，固溶强化效果甚微，因此**力学性能与纯铁相近**，表现为：强度硬度低、塑性韧性好

## 奥氏体 (A)

C 溶解在  $\gamma - Fe$  中形成的 **间隙固溶体**，通常用符号 **A** 表示

$\gamma - Fe$  的溶碳能力比  $\alpha - Fe$  高，在1148°C溶解度最高为  $W_C = 2.11\%$ ，但是由于固溶体的一些性质，A 还是**强度硬度不高，属性优良**。同时，**A 为高温组织**

## 金属化合物

金属化合物是合金组元互相作用形成的晶格类型和晶格特征**不同于任一组元**的新相

### 渗碳体 ( $Fe_3C$ )

Fe 与 C 形成的金属化合物， $W_C = 6.69\%$ ，其 **硬度高，脆性大，塑性差**。渗碳体过多会导致机械性能变差，少量渗碳体会提高材料的强度和硬度。

## 机械混合物

结晶过程中所形成的两相混合组织（前面两个是单相组织，这个直接是两相组织）

### 珠光体 (P)

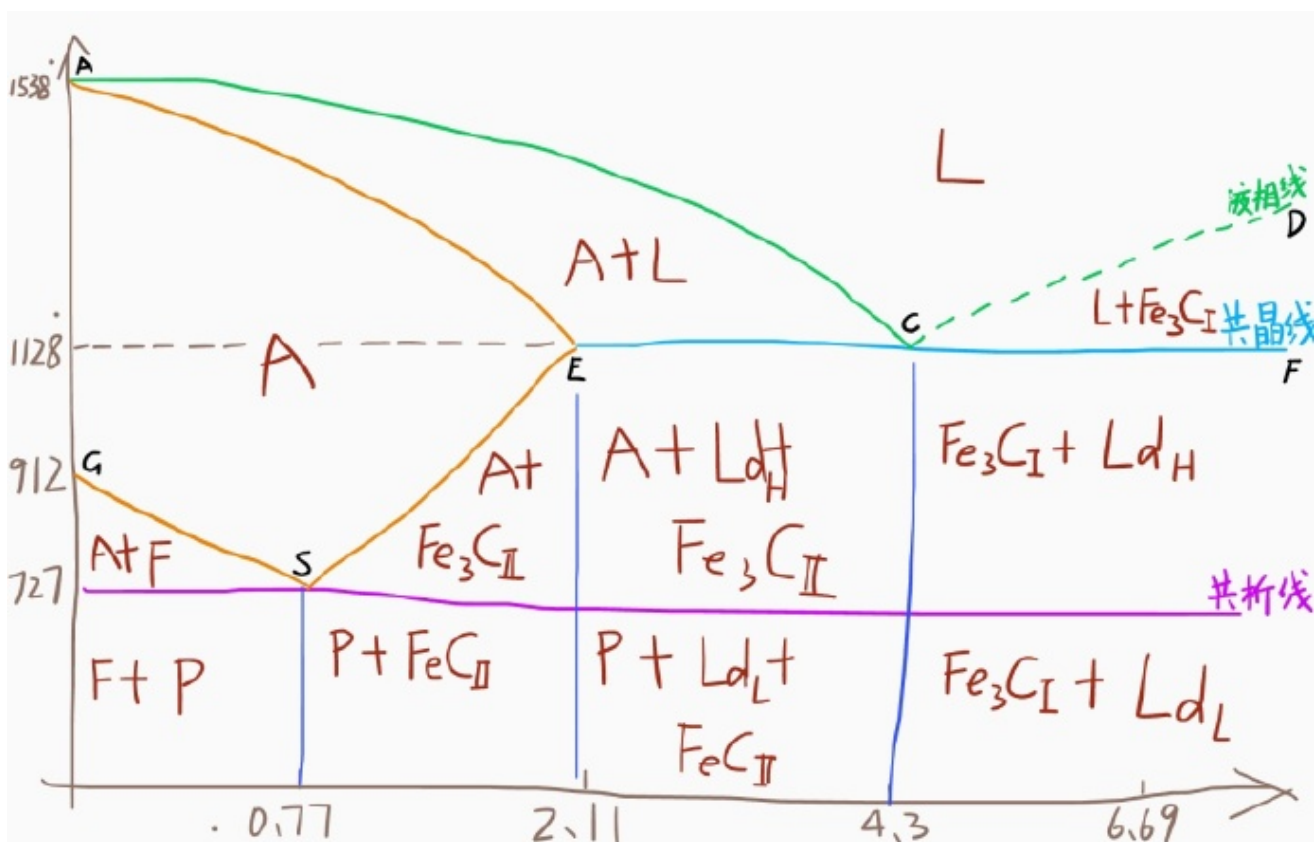
由 F 和  $Fe_3C$  组成的机械混合物， $W_C = 0.77\%$ ，层片越往细密，强度越高。珠光体兼具两者的优点，即具有较高的硬度、强度和良好的塑性、韧性

### 莱氏体 (Ld)

由 A或P 和  $Fe_3C$  组成的机械混合物， $W_C = 4.33\%$

## 铁碳合金相图

注图中1128应该改为1148， $Ld_H$ 为高温莱氏体， $Fe_3C_1$ 为一次渗碳体



## 点的含义

代号	温度(°C)	含碳量(%)	说明
A	1538	0	铁的熔点
C	1148	4.3	共晶点，发生共晶反应，由液态直接变为固态， $L \Rightarrow Ld_H(A + Fe_3C)$
D	1127	6.69	渗碳体的熔点
E	1148	2.21	C在 $\gamma - Fe$ 的最大溶解度
F	1148	6.69	渗碳体的成分
G	912	0	$\gamma - Fe \Leftrightarrow \alpha - Fe$ 同素异构体转变点
S	727	0.77	共析点，发生共析反应， $A \Rightarrow P(F + Fe_3C)$

注：

- 共晶反应：由液态直接变为固态， $L \Rightarrow Ld_H(A + Fe_3C)$ ，只有与共晶点成分相同的才会发生共晶反应
- 共析反应：由一种固相变为另外一种固相， $A \Rightarrow P(F + Fe_3C)$ ，只有与共析点成分相同的才会发生共析反应

注意：各个点的符号要求记住

## 线的分析

- ACD：液相线，ACD以上全是液体，冷却至ACD以下开始结晶。

- AECF: 固相线, AECF以下全为固体, 加热至AECF以上开始熔化。
- ECF: 共晶线, 发生共晶反应的区域,  $W_C = 2.11\% - 6.69\%$  可以发生共晶反应

EC段会发生共晶反应的原因: 在冷却过程中会析出 A, 而 A 的含碳量比较少, 此时剩余部分的含碳量会增加, 导致达到 C点, 这样就可以发生共晶反应了。同理CF段也是这样。

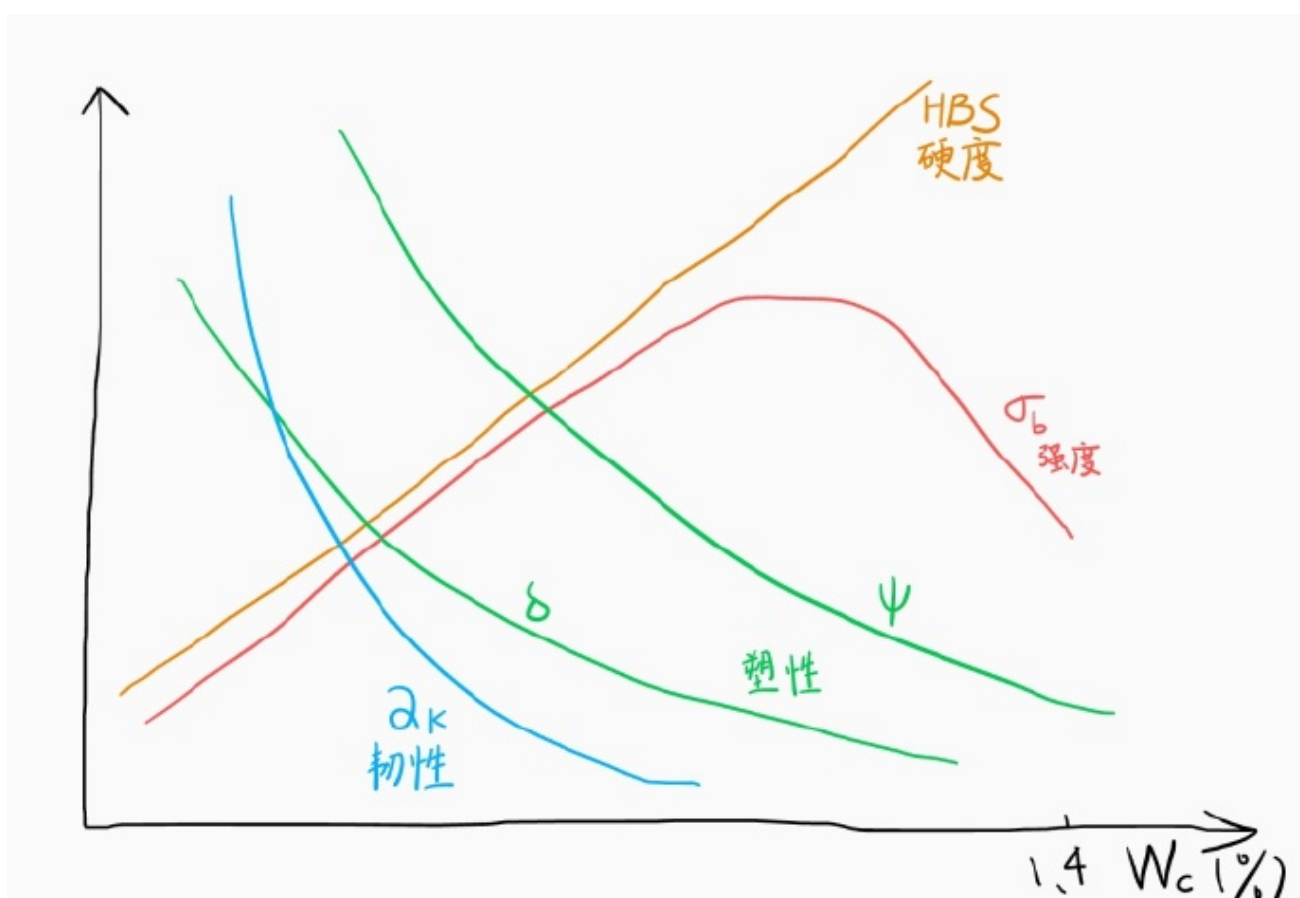
- 共析线: 发生共析反应的区域,  $W_C = 0.02\% - 6.69\%$  可以发生共析反应, 原因同上
- GS: 不同含碳量 A 冷却时析出 F 的线, 也叫  $A_3$  线。下面那条是 F 析出的终止线
- ES: C在 A 中溶解度曲线, 也叫  $A_{cm}$  线

## 相图中的铁碳合金分类

含碳量	<0.77%	0.77%	0.77%~2.11%	2.11%~6.69%
类别	亚共析钢	共析钢	过共析钢	铸铁
室温成分	$F + P$	$P$	$P + Fe_3C$	有 $Ld$

## 碳对铁碳合金力学性能的影响

如图, 随着含碳量的增加, 强度先升高后下降, 硬度上升, 塑性韧性下降



注: 在室温下, 含碳0.8%的钢其强度比含碳1.2%的钢高。

铁碳合金中渗碳体是强化相, 对于以铁素体为基体的钢来说, 渗碳体的数量愈多, 分布愈均匀, 其强度愈高。但随着含碳量的增加,  $Fe_3C$ 以网状分布于晶界上或呈粗大片状, 尤其是作为基体时就使得铁碳合金的强度、塑性、韧性大大下降。



# 常见金属材料及选用

## 金属杂质对钢性能的影响

### P、S

有害元素，可以使材料的塑性韧性急速下降

S会使 Fe 在1000~1200°C压力加工时，使晶粒脱开，发生 **热脆** 现象

P会使钢的塑性韧性急速下降，转化温度升高，发生 **冷脆** 现象

### Mn、Si

Mn 可以与 S 结合成 MnS，抵消 S 的有害作用

Si 溶于 F 中，可以使铁素体强化

## 碳素钢

### 碳钢的分类

铁碳合金中，碳质量分数小于2.11%的合金称为钢，常用的碳钢 W(C) 一般都小于1.3%。

- 按 W(C) 分
  - 低碳钢：  $W(C) \leq 0.25\%$
  - 中碳钢：  $0.25\% \leq W(C) \leq 0.6\%$
  - 高碳钢：  $0.6\% \leq W(C) \leq 2.1\%$
- 按 钢的质量 分
  - 普通碳素钢：  $w(S) \leq 0.055\%$ ；  $w(P) \leq 0.045\%$
  - 优质碳素钢：  $w(S) \leq 0.040\%$ ；  $w(P) \leq 0.040\%$
  - 高级优质碳素钢：  $w(S) \leq 0.030\%$ ；  $w(P) \leq 0.035\%$
- 按 用途 分
  - 碳素结构钢
  - 优质碳素结构钢
  - 碳素工具钢

### 碳素结构钢

碳素结构钢的含碳量 $w_c < 0.38\%$ ，而以 $w_c < 0.25\%$ 的最常见，即以**低碳钢**为主。

碳素结构钢的牌号用 **Q+数字** 表示，Q代表屈服点的“屈”字汉语拼音首字母，后面的三位数字表示该钢种厚度小于16mm时的**最低屈服强度（MPa）**。如Q235表示屈服强度为235MPa的碳素结构钢。在钢号尾部可用A、B、C、D表示钢的质量等级，**A级钢含硫、磷含量最高，D级含硫、磷含量最低**。若在牌号后面加注字母“F”则为**沸腾钢**，标注“B”为**半镇静钢**，不标注“F”或“B”者为**镇静钢**。

**碳素结构钢一般在供应状态下使用，不再进行热处理**，常见的碳素结构钢有：Q195、Q215、Q235A、Q235B、Q255、Q275等

### 优质碳素结构钢

其硫、磷含量较低（ $< 0.035\%$ ），供货时既保证化学成分，又保证力学性能，主要用于制造机器零件。



优质碳素结构钢的钢号用平均碳质量分数的 **万分数** 表示。如20钢表示平均含碳量为0.20%的优质碳素结构钢。若钢中 **锰含量较高**，钢号后应加符号“Mn”，如15Mn，45Mn等。

**优质碳素结构钢使用前一般都要经过热处理**。08F——塑性好，可制造冷冲压零件。10、20钢——冷冲压性与焊接性能良好，可用作冲压件和焊接件，经热处理（**渗碳+淬火+回火**）可制造轴、销等零件（表面要求耐磨的）。35、40、45、50钢——属于中碳钢，因钢中珠光体含量增多，其强度、硬度有所提高，而**淬火+低温回火**后的硬度提高明显。60、65钢——属于高碳钢，经淬火、回火后，不仅强度、硬度显著提高，且弹性优良，常用于制造小弹簧、发条、钢丝绳、轧辊、凸轮等；此类钢的热处理方式：**淬火+中温回火**。

## 碳素工具钢

碳素工具钢的碳质量分数在0.65%~1.35%之间

钢号用平均碳质量分数的**千分数**的数字表示，数字之前加“T”（碳的拼音首字母）。如：T9表示碳质量分数为0.9%（即千分之九）的碳素工具钢。碳素工具钢均为优质钢，若硫、磷含量更低，为**高级优质钢**，则在钢号后面标注“A”字。如：T12A表示碳质量分数为1.2%的高级优质碳素工具钢。

碳素工具钢较合金工具钢便宜，但**淬透性**和**热硬性**差。**碳素工具钢使用前都要经过热处理，如淬火+低温回火**。

## 合金钢

合金钢可以避免碳钢以下部分的不足：**渗透性低、强度低、回火稳定性差、不能满足特殊性能要求**

合金钢按用途分（我国采用）：合金结构钢、合金工具钢、特殊性能钢

合金钢的编号：

1. 碳的质量分数：在牌号首部用数字标明碳质量分数。

○ 结构钢

以万分之一为单位的数字（两位数）表示平均碳质量分数。40Cr 平均碳质量分数为0.40%；20CrMnTi 平均碳质量分数为0.20%

○ 工具钢

以千分之一为单位的数字（一位数）表示平均碳质量分数。工具钢的碳质量分数超过1%时，碳质量分数不标出。5CrMnMo 平均碳质量分数为0.5%；Cr2 平均碳质量分数为1.0%

○ 不锈钢和耐热钢

碳质量分数大于或等于0.04%时，以万分之一为单位的数字（两位数）表示；碳质量分数小于或等于0.03%时，以十万分之一为单位的数字（三位数）表示。12Cr13 平均碳质量分数为0.12%；022Cr22Ni5Mo3N 平均碳质量分数为0.022%

2. 主要合金元素

用元素符号表明钢中主要合金元素，其后标明质量分数。质量分数少于1.5%时不标数字，质量分数为1.5%-2.49%、2.5%-3.49%...时，相应地标2、3...。40Cr Cr的质量分数在1.5%以下；5CrMnMo Cr、Mn、Mo的质量分数均在1.5%以下；60Si2Mn Si的质量分数为1.5~2.0%，Mn质量分数均为0.7~1.0%

## 低合金高强度结构钢

高强度、高韧性、良好的焊接性能和冷成型性能、低的冷脆转变温度、良好的耐蚀性。

### 成分特点

- 低碳：韧性、焊接性和冷成型性能要求高，碳质量分数不超过0.20%。

- 加入以锰为主的合金元素。锰可以产生较强的固溶强化效果（溶入F），还可以大大降低奥氏体分解温度，细化F晶粒，并使珠光体变细，消除晶界上粗大的片状碳化物，提高钢的强度和韧性。
- 加入铌、钛或钒等元素：形成细碳化物或氮化物，获得细小铁素体晶粒，提高钢的强度和韧性。
- 加入少量的铜（0.4%）和磷（0.1%左右），可提高抗腐蚀性能。
- 加入少量的稀土元素，可脱硫、去气，使钢材净化，改善韧性和工艺性能。

### 常用的低合金高强度结构钢

- **Q345 (16Mn)**
  - 使用状态组织：细晶粒铁素体+索氏体。
  - 强度比普通碳素结构钢Q235高约20%-30%，耐大气腐蚀性能高20-38%，用来制造结构件时，重量可减轻20~30%
- **Q420 (15MnVN)**

强度较高。加入V、N后，生产钒的氮化物，可细化晶粒，又有析出强化的作用，强度较高，韧性、焊接性及低温韧性较好。可制造桥梁、锅炉、船舶等大型结构。

## [MOOC]问答

- 对同一成分的金属，晶粒越细，其强度、硬度愈高，为什么塑性和韧性也越好。对一般的材料，强度、硬度增加，塑性、韧性会降低。

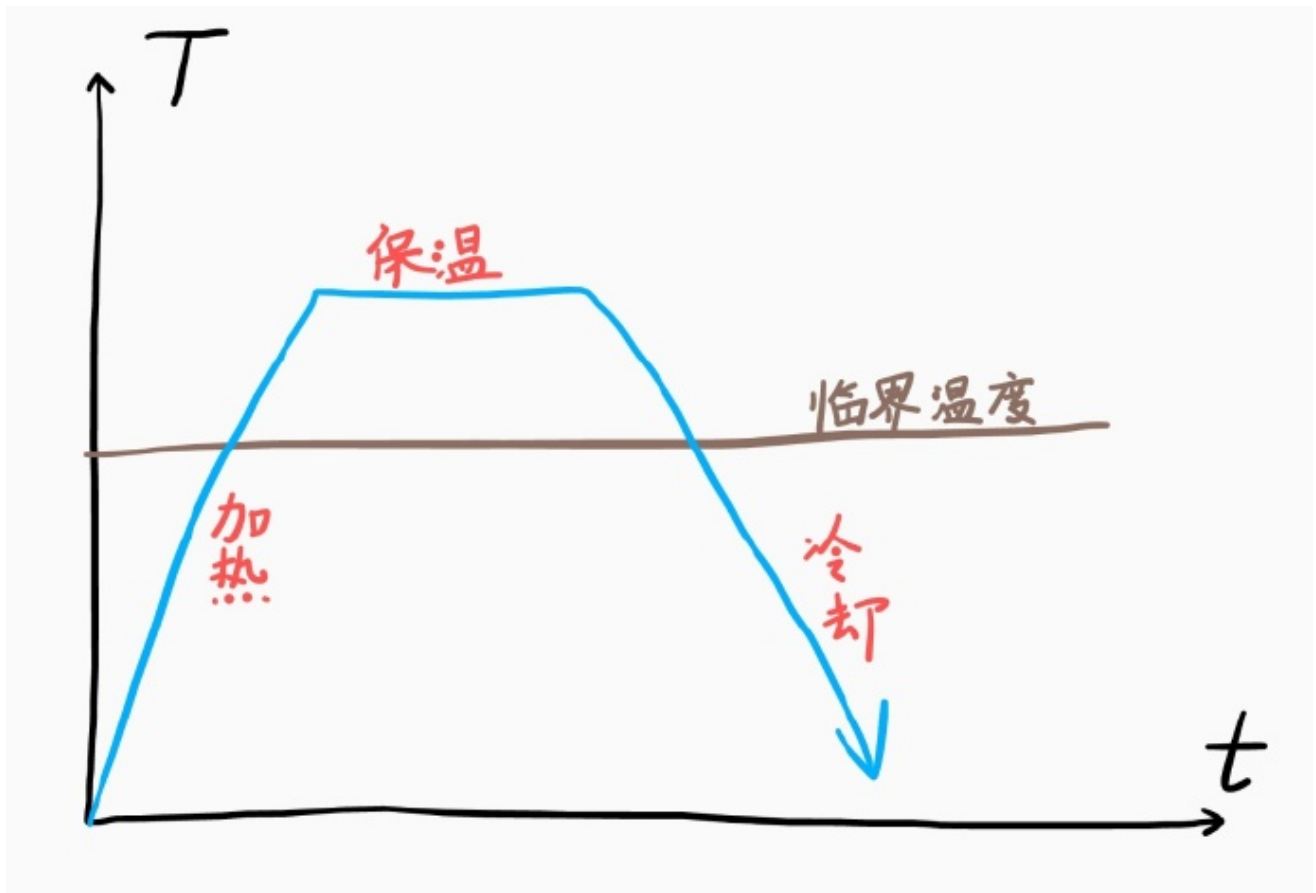
晶粒越细，晶界就越多，晶界处的晶格排列方向极不一致，犬牙交错、互相咬合，从而增加了塑性变形的抗力，提高了金属的强度。同时，金属的塑性和韧性也可得到提高。

- 根据Fe-C相图，解释以下现象
  1. 在室温下，含碳0.8%的钢其强度比含碳1.2%的钢高。
  2. 在1100°C，含碳0.4%的钢能进行锻造，含碳4.0%的生铁不能锻造。

(1)含碳量大于1.0%时，钢组织中析出的二次渗碳体在晶界形成连续的网络状，钢的脆性增加，强度下降。因此含碳0.8%的钢的强度高于含碳1.2%的钢。(2)含碳量0.4%的钢在1100°C时处于A区，容易发生塑性变形。适于锻造。含碳量4%的生铁在1100°C时，组织是由Ld和Fe<sub>3</sub>C组成，硬度高硬，脆性大，塑性变形能力差，因而不能锻造。

## 金属材料热处理

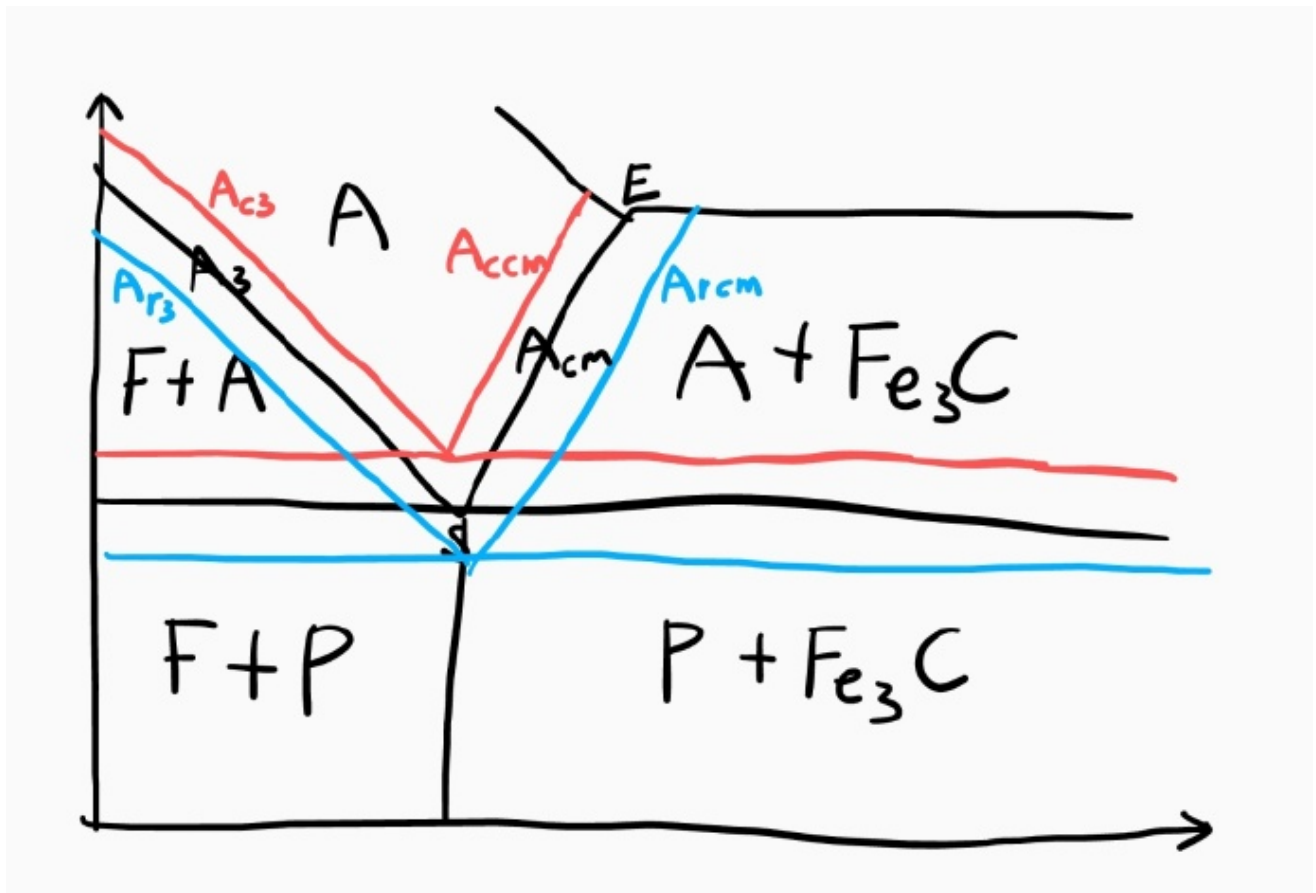
热处理是将钢在固态下以一定的方式进行 **加热**、**保温**，然后采取合适的方式 **冷却**，让其获得所需要的组织结构和性能的工艺。



## 钢在加热时的组织转变

大多数热处理工艺（如淬火、正火等）都要将钢加热到临界温度以上，获得全部或部分奥氏体组织，即进行**奥氏体化**。

然后在实际的热处理过程中：铁碳合金相图和上面说的有所不同，上面的铁碳合金相图是充分反应状态下的情况，在实际过程中，**处理的时间是有限的**。因此实际上会有变化。**加热到原来的组织需要更高的温度**，因此加热的线比原来高（如红线），同理降温的线比原来低（如蓝线）。这个现象叫**过热和过冷**



## 影响 A 转变速度的因素

- 加热温度  $T \uparrow \Rightarrow v(A) \uparrow$
- 加热速度  $\Delta v_T \uparrow \Rightarrow v(A) \uparrow$
- 钢中碳质量分数  $W(C) \uparrow \Rightarrow S \uparrow \Rightarrow v(A) \uparrow$
- 原始组织

原始组织中渗碳体为片状时，奥氏体形成速度快，因为它的相界面积较大；并且，渗碳体间距越小，相界面越大，同时奥氏体晶粒中碳浓度梯度也大，所以长大速度更快。

## 奥氏体的晶粒度及其影响因素

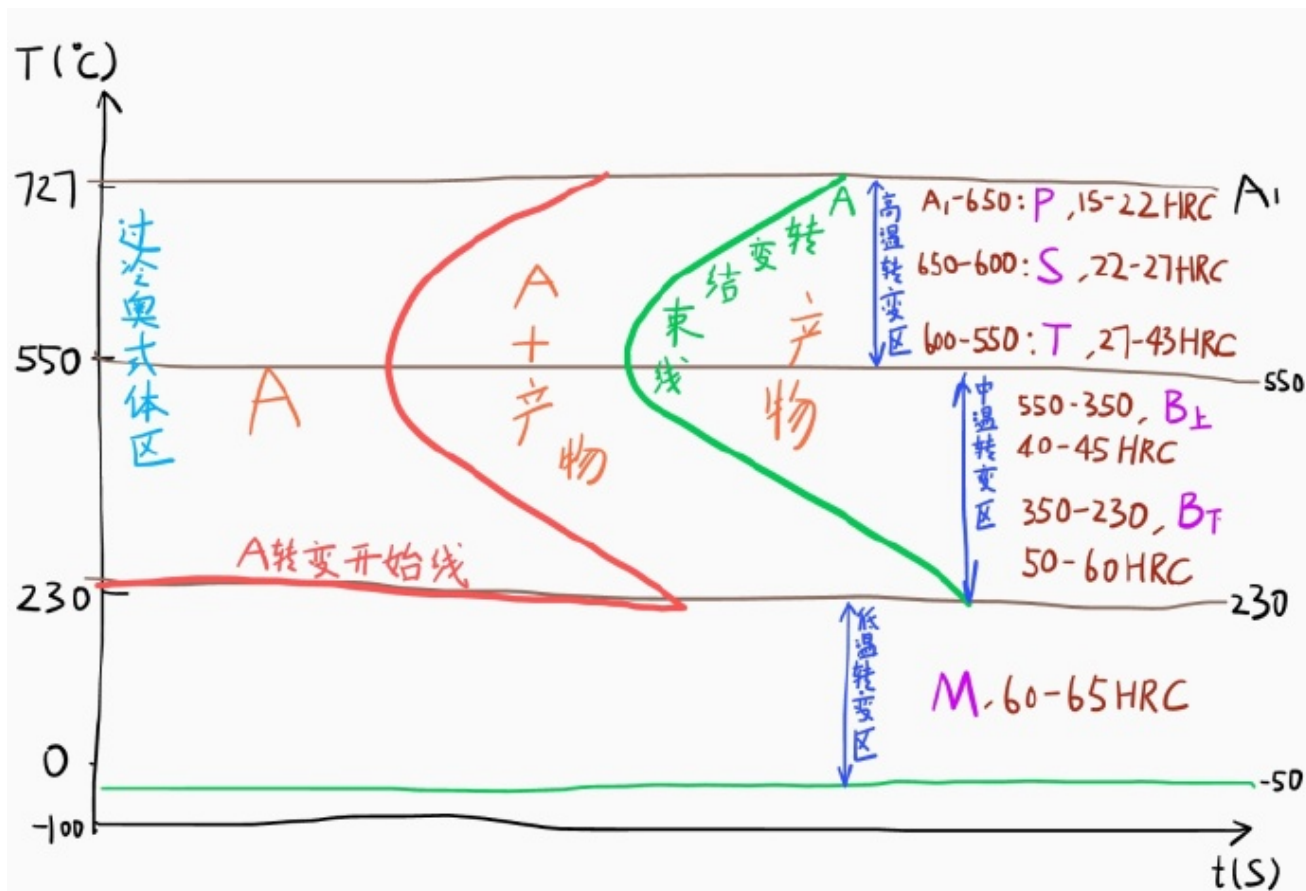
晶粒度就是晶粒大小。晶粒度越小，金属强度硬度韧性塑形越好。生产中一般采用标准晶粒度等级图，由比较的方法来测定钢的奥氏体晶粒大小。

加热温度越高，保温时间越长，晶粒度越大，材料性能越差。奥氏体中碳的含量增高时，晶粒长大的倾向增多。若碳以未溶碳化物的形式存在，则它有阻碍晶粒长大的倾向。

## 钢在冷却时的组织转变

从铁碳合金相图可知，当温度在  $A_1$  以上时，奥氏体是稳定的，能长期存在。当温度降到  $A_1$  以下时，奥氏体即处于过冷状态，这种奥氏体称为过冷奥氏体。过冷奥氏体是不稳定的，它会转变为其他组织，钢在冷却时的转变，实质上是过冷奥氏体的转变。

过冷奥氏体的等温转变过程和转变产物可用等温转变曲线（TTT曲线）：



奥氏体从过冷到转变开始这段时间称为**孕育期**，孕育期的长短反映了过冷奥氏体的稳定性大小。曲线的“鼻尖”处（约550°C）孕育期最短，过冷奥氏体的稳定性最小。

可以看到，等温转变曲线被分为三块：高温转变区（珠光体转变区）、中温转变区（贝氏体转变区）、低温转变区（马氏体转变区）

在高温转变区内，根据珠光体的形态，又分为：粗片状P；15~22HRC、细片状P[**索氏体S**]；22~27HRC、极细片状P[**屈氏体T**]；27~43HRC。奥氏体向珠光体转变是一种**扩散型**的生核、长大过程，是通过碳、铁的扩散和晶体结构的重构来实现的。

贝氏体转变是介于珠光体和马氏体转变之间的一种转变，又称中温转变。转变产物为贝氏体（B）是**含C过饱和的F和碳化物的机械混合物**。由于温度降低， $\gamma - Fe$ 转变为了 $\alpha - Fe$ ，发生了重结晶，使C从F中析出。**共析钢与过共析钢没有贝氏体转变区**（因为没有F）。

马氏体型(M)转变(230~-50°C)：**M是一种C在 $\alpha - Fe$ 中的过饱和间隙固溶体**。有以下转变特点：①在一个温度范围内**连续**冷却完成；②转变**速度极快**，即瞬间形核与长大；③无扩散转变（Fe、C原子均不扩散），M与原A的成分相同，造成晶格畸变；④转变不完全性，冷却到室温时仍残余奥氏体存在-50°C才转变完全。

## 奥氏体连续冷却转变

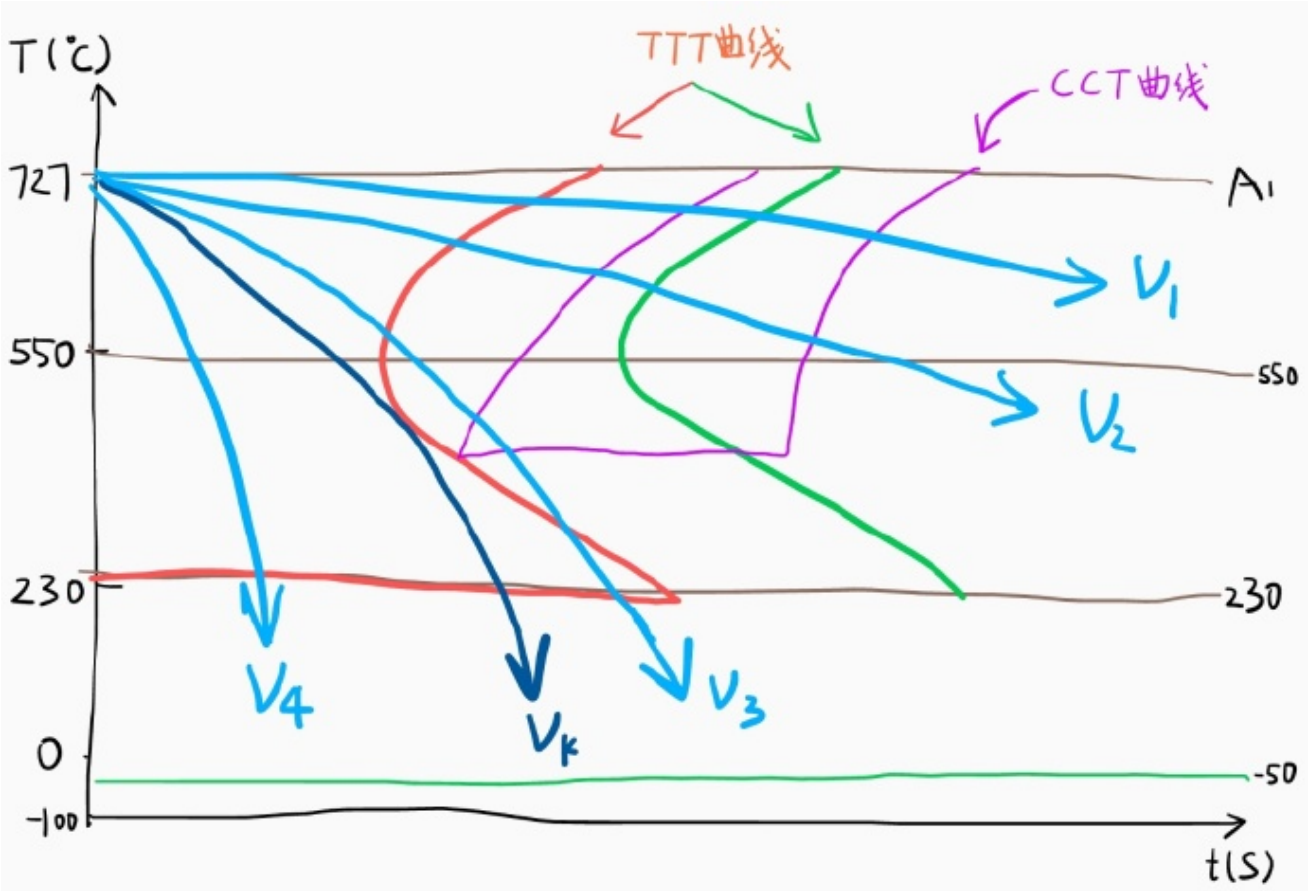
### CCT曲线

这个曲线下面有，这里就不画了。与TTT曲线比较，CCT图中的所有曲线均向右下“漂移”；所有转变均呈现“滞后”现象。同时，CCT曲线中的P和B的“C”形曲线也只有上半部分。相变滞后现象可能导致贝氏体转变被抑制。

这是因为F析出使A碳的质量分数升高，因而开始转变线右端下降

### 连续冷却转变产物

由于共析钢在连续冷却时的转变测定较困难，生产中常利用TTT曲线分析估计连续冷却转变的结果，即按TTT与CCT曲线叠加后相交的大致位置，估计连续冷却后得到的组织。



冷速类型	冷却方法	转变产物	硬度	解释
$v_1$	相当于炉冷	P	15-25HRC	过冷A转变为P
$v_2$	相当于空冷	S	25-35HRC	过冷A转变为S
$v_3$	相当于油冷	T+M+A	45-55HRC	尽管穿过了贝氏体区，但因在CCT曲线中无B转变区，所以在连续冷却时不会得到B组织，而会转变为T、M和残余A的混合组织
$v_k$	相当于油冷或水冷	M+A	55-65HRC	过冷奥氏体转变为M和残余A
$v_4$	相当于水冷	M+A	55-65HRC	过冷奥氏体转变为M和残余A

## 热处理工艺方法



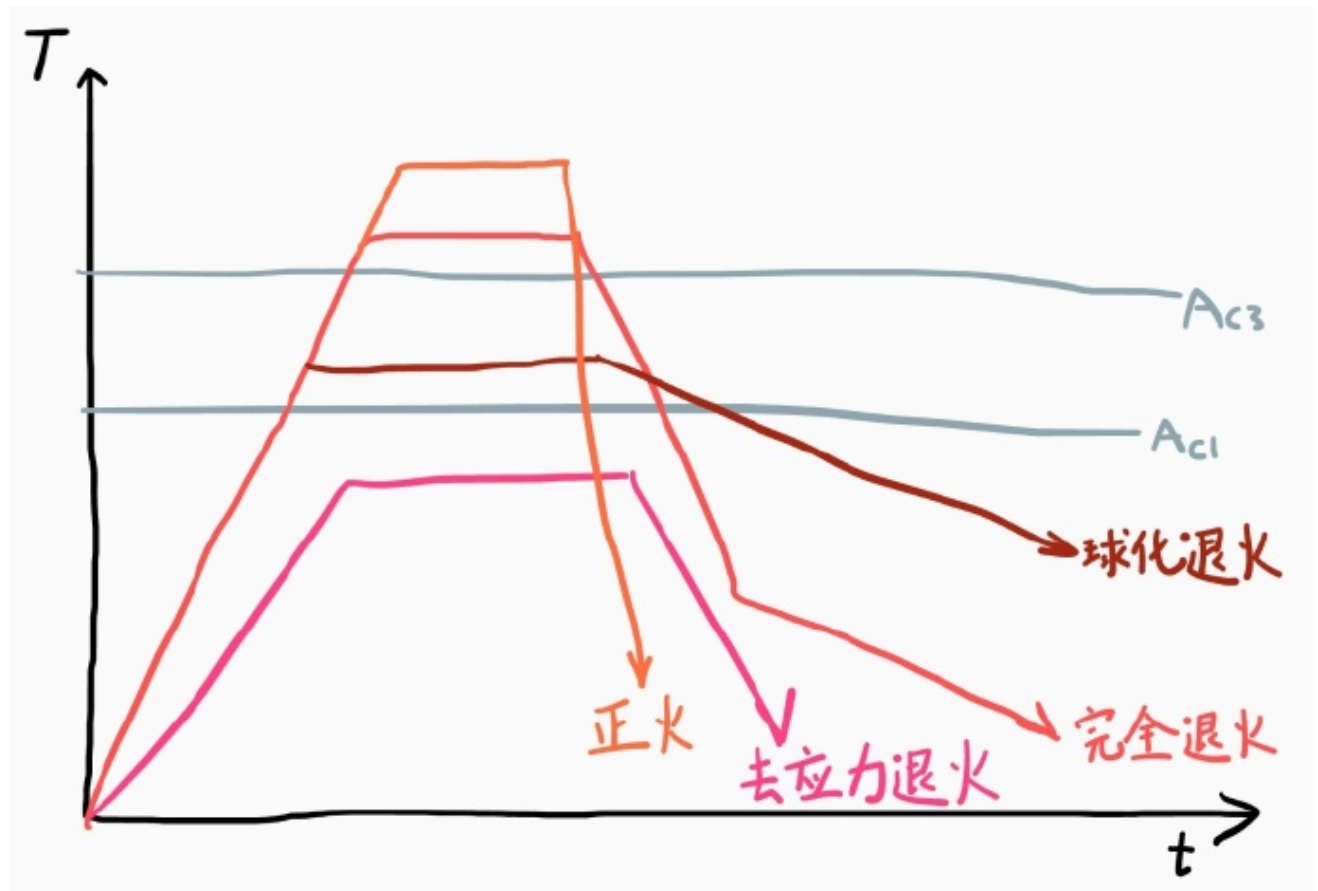
分为整体热处理（退火、正火、淬火、回火）、表面热处理、化学热处理

## 退火

将钢加热至临界温度，保温一段时间，然后埋入导热性较差的物质，缓慢冷却，以得到平衡状态组织的热处理工艺

### 目的

- 降低硬度、提高塑性，以利于切削加工或继续冷变形加工
- 细化晶粒，提高钢的塑性和韧性
- 消除内应力，为淬火供需做好准备



注：图中完全退火冷却时的斜率搞反了

### 完全退火

钢加热到 $A_{c3}$ 线以上 $30 \sim 50^{\circ}\text{C}$ ，保温一定时间而获得完全的 A 组织，然后随炉冷却到 $500^{\circ}\text{C}$ 以下，再出炉并在空气中冷却，最终获得平衡组织 F+P。

作用是：提高塑性韧性，降低硬度，改善切削加工性能

主要应用与 **亚共析钢**，过共析钢不宜使用。

这是由于过共析钢缓冷时会析出二次网状渗碳体，大大降低材料的属性和韧性，可能在之后的加工中开裂

### 球化退火



是将钢件加热到 $A_{cl}$ 线以上 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$ ，保温较长时间，然后以极其缓慢的速度冷却到 $600^{\circ}\text{C}$ 以下，再出炉空冷的热处理工艺。

保留较多的未溶碳化物粒子或使较大的奥氏体中碳浓度分布不均匀，促进球化物的生成，将 **网状渗碳体** 转化为 **球状渗碳体**。

主要应用于 **过共析钢**，用来降低硬度，改善切削加工性能，为淬火做准备

## 再结晶退火

再结晶退火(recrystallization annealing) 是将钢件加热到再结晶温度以上 $150 \sim 250^{\circ}\text{C}$ ，即 $650 \sim 750^{\circ}\text{C}$ 范围内，保温一定时间后**随炉冷却**，通过再结晶使钢材的**塑性**恢复到冷变形以前的状况。

低温再结晶退火可用于冷轧、冷拉、冷压等产生**加工硬化**的各种金属材料处理。

## 去应力退火

去应力退火(stress relieving) 是将钢件**随炉缓慢加热**( $100 \sim 150^{\circ}\text{C/h}$ )至 $500 \sim 650^{\circ}\text{C}$ ，保温一定时间，然后**随炉缓慢冷却**( $50 \sim 100^{\circ}\text{C/h}$ )至 $300 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 以下再出炉空冷。

目的是 **消除** 铸造、锻造、焊接等中的 **内应力**。**去应力退火不发生组织转变**。

## 等温退火

(课本上没有)

是将钢件加热到 $A_{c3}$ 线以上(对亚共析钢)或 $A_{c1}$ 线以上(对共析钢和过共析钢)，保温后较快冷却到稍低于 $A_{c1}$ 线温度，即珠光体型转变温度范围内，一直等温保持到奥氏体**全部转变为 珠光体** 型组织为止，然后出炉置空气中冷却。

等温退火与完全退火目的、加热方法及保温时间基本相同，但可通过控制等温温度，更快获得所需的均匀组织和性能，退火效果较好，并可大大**缩短**约一半以上的退火**时间**，主要用于奥氏体较稳定的**合金工具钢和高合金钢**等

## 正火

正火是将钢件加热至 $A_{c3}$ (对亚共析钢)或 $A_{cm}$ (对过共析钢)以上 $30 \sim 50^{\circ}\text{C}$ ，经保温后从炉中取出并在空气中冷却的热处理工艺。正火冷却速度稍快，过冷度较大，可获得较细的 **珠光体型索氏体** 组织。

## 目的

- 对于普通碳素钢、低合金钢，正火可以细化晶粒，并使组织均匀化；
- 提高低碳钢工件的硬度和切削加工性能；
- **消除过共析钢中的网状碳化物**，为球化退火或淬火作准备；
- 消除切削加工后的硬化现象和去除内应力；

关于退火与正火的选择：退火比正火的生产周期短，耗能少，且操作简便，故在可能的条件下，应优先考虑以退火代替正火。

## 淬火

淬火是将钢加热到 $A_{c3}$ (亚共析钢)或 $A_{c1}$ (共析或过共析钢)以上即 $30 \sim 50^{\circ}\text{C}$ 间，保温一定时间使其奥氏体化，然后在冷却介质中迅速冷却的热处理工艺。

淬火的**目的**：获得 M(马氏体) (个别情况下获得 B )组织，以提高钢的硬度和耐磨性，如各种工模具、量具、滚动轴承等均需通过淬火提高硬度和耐磨性。

过饱和的碳造成了 **M 晶格的严重畸变**，使其变形抗力比较大，因此 M 具有较高的耐磨性和硬度。绝大多数要求高硬度和高耐磨性的中高碳钢都要进行淬火工艺

淬火是一种复杂的热处理工艺，又是决定产品质量的关键工序之一，淬火后要得到小的马氏体组织又不致产生严重的变形和开裂，必须根据钢的成分、零件的大小、形状等，结合C曲线合理地确定淬火加热和冷却的方法。

淬火加热温度的确定

钢种	温度
亚共析钢	$A_{c3} + (30-50) ^\circ\text{C}$
共析钢、过共析钢	$A_{c1} + (30-50) ^\circ\text{C}$
一般合金钢	$A_{c1}$ 或 $A_{c3} + (30-50) ^\circ\text{C}$

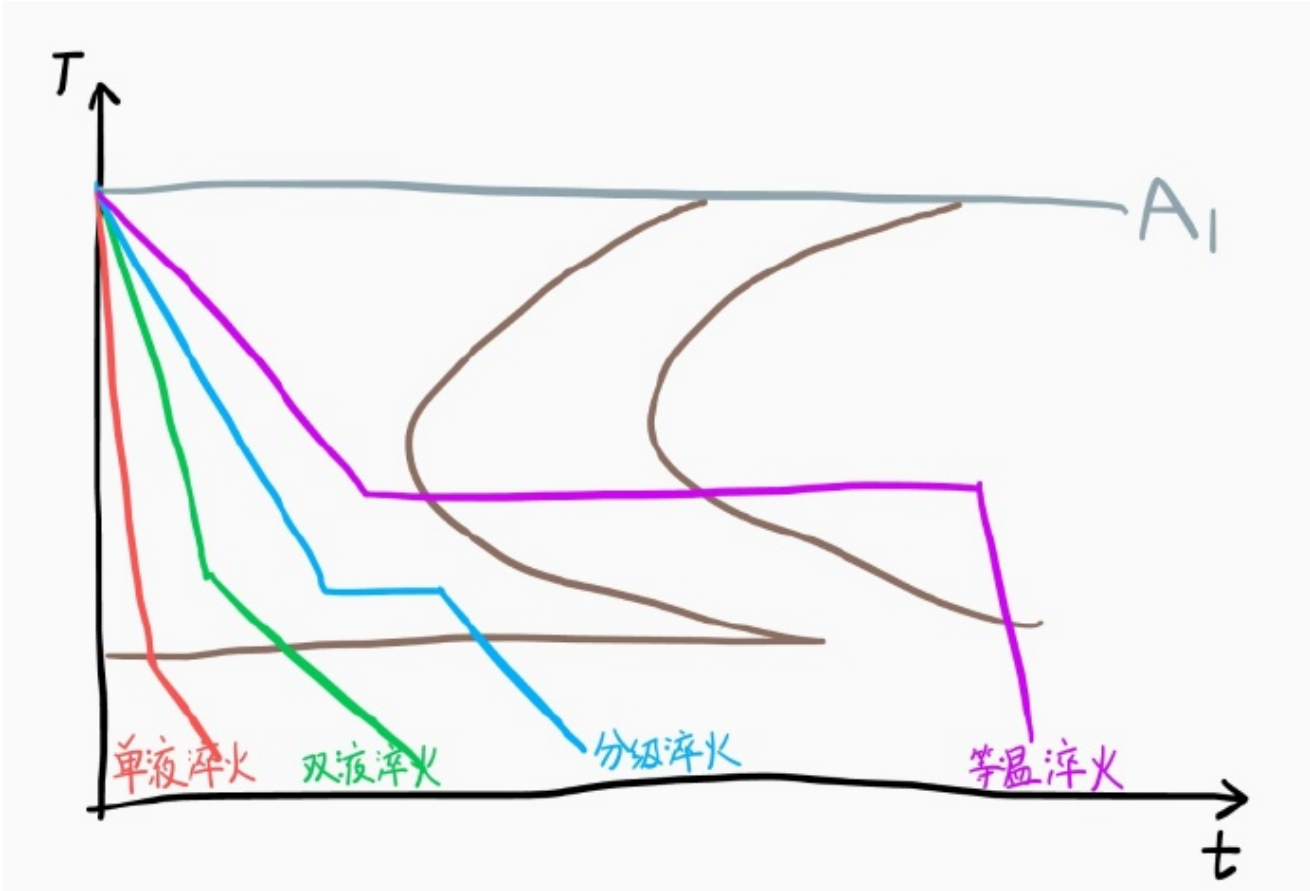
淬火冷却介质的选择

淬火介质的冷却速度又不能过快，在满足能获得马氏体的条件下，应使冷却速度尽可能低，以减少工件的开裂和变形。

冷却速度：盐水 > 水 > 盐浴 > 油

淬火方法的选择

这里需要考虑到零件是有厚度的，零件内部各个地方温度不一样



- **单介质淬火**是将奥氏体化后的工件放入一种淬火介质中连续冷却到室温的淬火方法，如碳钢在水中淬火，合金钢在油中淬火，操作简单，易于实现机械化与自动化，适用于形状简单的工件。

- **双介质淬火**是将奥氏体化工件先放入一种冷却能力较强的介质中，当工件冷到300℃左右时，再放到另外一种冷却能力较弱的介质中冷却。如先水冷后油冷、先水冷后空冷或先油冷后空冷等。双介质淬火法的马氏体转变是在冷却能力较低的介质中进行，故产生的内应力较小，可减小变形和开裂的可能性，常用于形状较复杂的工件，如碳素工具钢中的钻头、铰刀。
- **分级淬火**是将奥氏体化工件放入温度稍高于Ms点(约260℃)的冷却介质(盐浴或碱浴)中，停留2~5 min，使工件内外温度达到均匀后取出空冷，以获得马氏体组织，此法仅适用于截面尺寸较小(或厚度小于10mm)的工件。
- **等温淬火**是将奥氏体化工件放入温度稍高于Ms温度(260~400℃)的盐浴中等温一定时间，使过冷奥氏体转变为强度高、韧性好的**下贝氏体**，然后再用空气中冷却的淬火方法。此法只应用于尺寸要求精确、形状复杂、有较高强韧性的小型工件及工模具，如弹簧、小齿轮及丝锥等。

## 钢的淬透性

淬透性是指钢在淬火时 **获得马氏体** 的能力，它是钢的固有属性，取决于钢的临界冷却速度、过冷奥氏体的稳定性。

## 钢的淬硬性

淬硬性是指钢淬火后形成的淬火态组织 (M+Ar) 所达到的 **最高硬度**，即钢在淬火时的硬化能力。钢的淬硬性取决于马氏体含碳量和残余奥氏体数量。

## 回火

回火是消除内应力并获得要求的组织和性能，淬硬后加热到AC1线以下的某一温度，保温一定时间，然后冷却到室温的热处理工艺。

回火的目的是：

- 消除回火的残余应力，提高材料的塑形和韧性
- 使材料获得良好的综合力学性能
- 促进残余奥氏体向稳定的平衡组织转化，稳定工件尺寸，使其不变

淬火钢不能直接使用，必须进行回火处理

首先，淬火得到的 M 与残余 A 都是不稳定的组织，在工作中会向平衡组织转化，会导致零件尺寸的变化；其次，马氏体硬度高，脆性大，并存在很大的内应力，很容易造成工件的变形和断裂；最后，回火可以获得要求的塑性韧性。

回火有以下规律：回火温度越高，材料强度硬度下降越大，塑性韧性升高越大。

### 低温回火

- 温度：150-250℃
- 回火后组织：回火 M + 残余 A
- 目的：降低淬火应力，提高工件韧性、保证淬火后高硬度与高耐磨
- 应用：各种刀具、模具、滚动轴承

### 中温回火

- 温度：350-500℃
- 回火后组织：回火 T
- 目的：使工件获得较高的**弹性**和强度，适当的韧性和硬度
- 性能：35-50HRC，较高的弹性极限和屈服强度、冲击韧性

常常用于制作弹簧

## 高温回火

- 温度：500-650°C
- 回火后组织：回火 S（其中的渗碳体为颗粒）
- 目的：使工件获得强度、塑性和韧性都较好的综合力学性能。
- 性能：强度、塑性和韧性都比较好，硬度一般为25 ~ 35HRC。

通常将淬火 + 高温回火称为**调质处理**，简称调质。调质钢硬度高，而且塑形和韧性也比较高

二次硬化：在回火过程中发生**残余 A 向 M 转变**的二次淬火现象。这可使某些钢的硬度在回火后有所升高，形成二次硬化。

## 淬火钢回火后的力学性能

### 第一类回火脆性

淬火碳钢在250-400°C温度范围内回火，室温冲击韧度出现低谷，它几乎在所有钢中出现。

防止方法：避免在脆化温度范围内回火；加热重新淬火

### 第二类回火脆性

某些合金钢在450-650°C范围内回火，或在稍高温回火后缓慢冷却后出现的脆性，叫第二类回火脆性（或马氏体高温回火脆性）。

防止方法：重新回火，回火后快速冷却，可避免回火脆性发生；另外，在钢中加入W（1%）、Mo（0.5%）等合金元素，可有效地抑制这类回火脆性的产生。

## 表面淬火处理

用于获得高强度、高耐磨性的表面，而心部保持原来良好的韧性，常常用于齿轮、曲轴等的加工

## [MOOC]问答

- 为什么合金钢通常不在水中淬火？

**合金钢淬火稳定性高**，在油中可以获得单一的马氏体组织，为了防止淬火**变形和开裂**，故合金钢一般在油中淬火而不在水中淬火。

- 柴油机凸轮轴，要求凸轮表面有高的硬度(HRC>50)，而心部具有良好的韧性(Ak>40J)，原来用含碳量为0.45%的碳钢调质，再在凸轮表面进行高频淬火，最后低温回火。现因库存钢材用完，拟用含碳量为0.15%的碳钢代替。试说明：原含碳量为0.45%钢的各热处理工序的作用。

**调质**：得到回火索氏体，使工件具有良好的综合机械性能。**表面高频淬火**：表面获得良好的强度硬度，心部保持良好的塑性韧性。**低温回火**：降低淬火应力和脆性，提高工件韧性，保证淬火后的高强度与耐磨性

- 精加工后可安排的热处理有**氮化处理**

## 铸造工艺基础

铸造是指将**熔炼**好的液态金属浇筑到与零件相适应的**铸型**型腔中，待其冷却凝固后，获得**毛坯或零件**的方法。

优点：

- 可以制造形状复杂的零件

- 适用范围广
- 铸造用零部件来源广泛、价格低廉
- 铸铁加工的唯一方式

不足：

- 工艺复杂，比较难控制
- 液态成形内部均匀性差、致密性差
- 零件容易出现**缩孔、气孔、沙眼、夹杂、裂纹**等缺陷，产品不稳定
- 内部晶粒粗大组织不均匀，力学性能差

液态合金的工艺性能表征为液态合金的 **铸造性能**（包括 **流动性、凝固特性、收缩性、吸气性及偏析**等性能）

# 液态合金的充型

液态金属 **充满型腔**并是**铸件形态完整、轮廓清晰** 的能力，称为合金的 **充型能力**

充型能力不足可能会导致：**浇不足、冷隔、气孔、夹砂、夹杂** 等缺陷

造成铸件产生浇不足的主要原因是充型能力不足。

充型能力的决定因素为：**合金的流动性、铸件性质、浇注条件、铸件结构**

上方文字选填题预定

## 合金的流动性

同种合金中成分不同的合金具有不同的结晶特点，流动性也不同。

有以下特性：

- **两相区结晶，流动性较差**（共晶点处流动性最好）（由于在两相区，结晶是在一个温度区间进行的，初生的树枝状会使已结晶的地方比较粗糙，使流动性变差）
- **恒温下结晶，流动性较好**（恒温下，金属结晶有表层逐层向内，已结晶的金属比较光滑）

含碳量为4.3%的铁有良好的可铸性

## 浇注条件

浇注条件	解释	结论
浇注温度	浇注温度越高，液态金属含热量高、粘度小，保持液体时间长，充型能力强	$T \uparrow \rightarrow \uparrow$
充型压力	这个不用解释。。。	$P \uparrow \rightarrow \uparrow$
浇注系统	结构越复杂，阻力越大，充型能力越差	复杂 $\uparrow \rightarrow \downarrow$

## 铸型性质

- 铸型温度 $\uparrow \rightarrow$  充型能力 $\uparrow$
- 蓄热能力 $\uparrow \rightarrow$  充型能力 $\uparrow$
- 铸型中气体 $\uparrow \rightarrow$  内部压力 $\uparrow \rightarrow$  充型能力 $\uparrow$

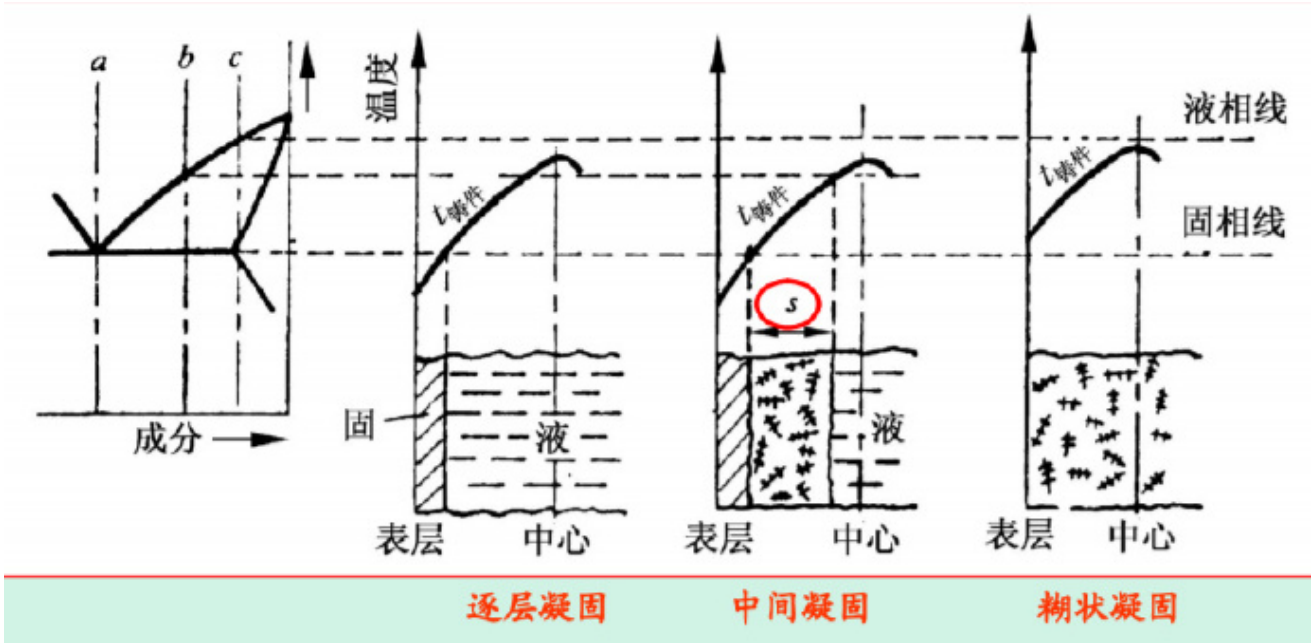
## 提高流动性

- 1. 选用共晶成分的材料，或结晶温度范围窄的材料
- 2. 提高浇注温度、充型压力
- 3. 提高合金液体质量，减少气体、杂质
- 4. 合理设置浇注系统，改进铸件结构

## 铸造合金的凝固与收缩

### 液态金属的凝固

在铸件的凝固过程中，截面一般存在三个区域，即液相区、凝固区、固相区。对铸件质量影响较大的主要是液固并存的凝固区的宽窄。铸件的凝固方式就是依据凝固区的宽窄来划分的。



一般来说逐层凝固，合金的充型能力强，便于防止缩松和缩孔等缺陷

### 影响凝固方式的因素

主要是合金的 **结晶温度范围** 和 **铸件的温度梯度**（就是温度变化的斜率）（铸型蓄热能力 $\uparrow$ 、铸型温度 $\uparrow \rightarrow$  温度梯度 $\uparrow \rightarrow$  凝固区域窄）

填空题预定

### 铸造合金的收缩

铸件在**液态**、**凝固态**和**固态**冷却过程中所发生的体积减小的现象，称为收缩。收缩是多种铸造缺陷（如缩孔、缩松、裂纹、变形等）产生的根源。

有两种：**体收缩**（液态收缩、凝固收缩）和 **线收缩**（固态收缩）



类型	收缩类型	铸造缺陷
线收缩	固态收缩	应力、变形、裂纹
体收缩	液态收缩、凝固收缩	缩松、缩孔

影响因素

- 化学成分（石墨的析出产生的体积膨胀，会抵消部分凝固收缩）
- 浇注温度（温度越高，过热度越大，收缩量越大）（在满足流动性要求的前提下，尽可能降低浇注温度）
- 铸件结构与铸型条件

缩松与缩孔

缩孔

**纯金属、共晶成分和凝固温度范围窄的合金**（条件①），浇注后在型腔内是由表及里的**逐层凝固**（条件②）。在凝固过程中，如得不到合金液的补充，在铸件最后凝固的地方就会产生**缩孔**。

产生原因：合金的液态收缩和凝固收缩值大于固态收缩值，且得不到补偿。

缩孔产生的部位在铸件**最后凝固区域**，如壁较厚大的上部或铸件两壁相交处，这些地方称为热节。

**合金的液态收缩和凝固收缩愈大、浇注温度愈高、铸件愈厚，缩孔的体积愈大。**

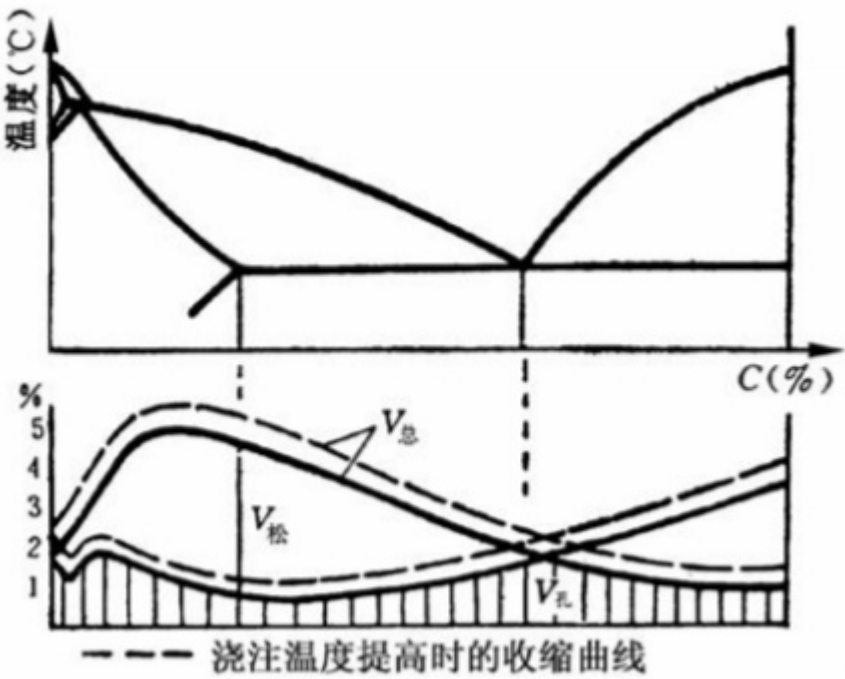
缩松

非共晶成分的合金或有较宽结晶温度的合金成 **糊状凝固**。

**缩松形成的条件：**铸件主要呈糊状凝固方式凝固，成分为非共晶成分或有较宽结晶温度范围的合金。

影响因素

- 合金成分





**结晶范围小的合金，产生缩孔的倾向大；结晶范围大的合金，产生缩松的倾向大**

- 浇注条件

**浇注温度越高，缩松缩孔倾向越大**

- 铸型材料
- 铸件结构

### 防止方法

- 控制铸件的凝固过程

使铸件 **顺序凝固** 或 **同时凝固**。

- 顺序凝固：让铸件远离冒口的地方先凝固，靠近冒口的地方后凝固。最后才是冒口本身凝固。适用于收缩大，或壁厚大的合金铸件

冒口补缩作用好，但是容易产生铸造应力、变形及裂纹等等

为保证铸件质量，通常同时凝固适合于 **缩孔** 倾向大的铸造合金

- 同时凝固：采取必要的措施，使得部件各个部分的冷却速度相同，几乎同时凝固完全。（添加冷铁、将浇注口设置在壁厚较小的地方）

不用设置冒口，使工艺简化，提高了良品率

为保证铸件质量，通常同时凝固适合于 **变形和裂纹** 倾向大的铸造合金

- 合理应用冒口、冷铁等工艺措施

- 冒口一般设置在热节处，这样防止变形和裂纹的效果最好，同时冒口应该保证比铸件凝固晚，然后有足够的金属液

不要将冒口设置在铸件重要的或受力较大的部位，以防组织粗大，降低该处强度。

- 冷铁用来加大某一部分的冷却速度

### 铸件的内应力、变形与裂纹

名称	解释
热应力	由于铸件 <b>厚薄不一致</b> ，各部分 <b>冷却速度</b> 也不相同，使在同一时间内，各部分 <b>收缩不一致</b> 而造成的内应力
机械应力	铸件在收缩过程中 <b>受到铸件或型芯阻扰</b> 造成的应力
变形	<b>残余热应力</b> 的存在，使得铸件存在于一种非稳定的状态中，铸件将 <b>自发的通过变形来减缓热应力</b> ，来达到平衡的状态
裂纹	当铸件应力超过金属的材料极限是，铸件产生裂纹

### 热应力

由于铸件**厚薄不一致**，各部分 **冷却速度** 也不相同，使在同一时间内，各部分 **收缩不一致** 而造成的内应力。下面说说热应力的形成

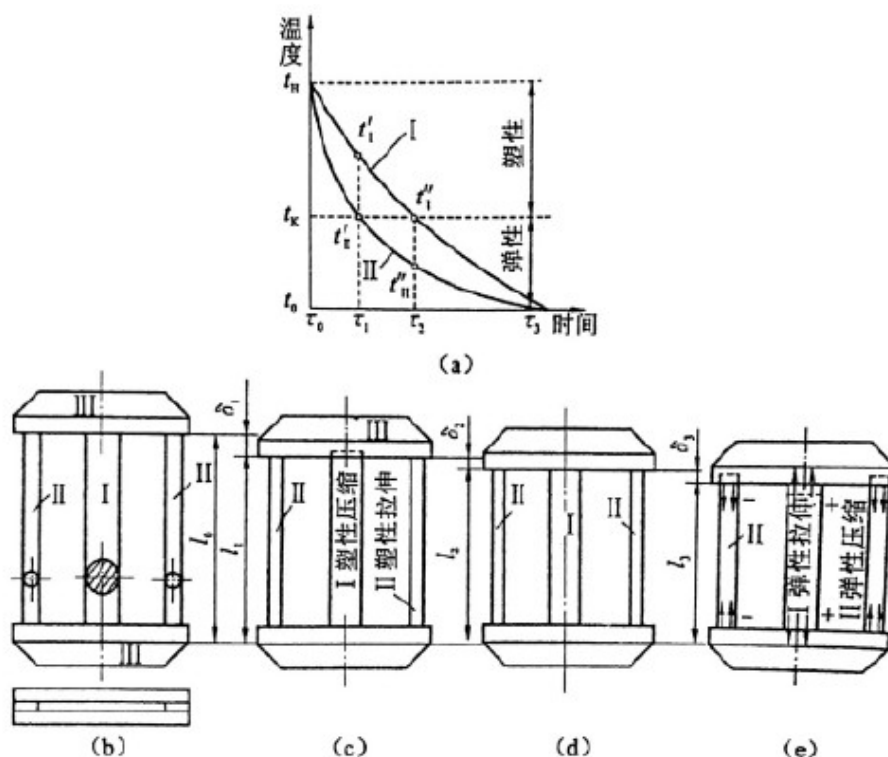


图 5-14 框形铸件热应力形成过程

(a) I、II 两杆固态冷却曲线；(b) 铸件；(c)  $\tau_0 \sim \tau_1$  阶段；(d)  $\tau_1 \sim \tau_2$  阶段；(e)  $\tau_2 \sim \tau_3$  阶段

温度在  $t_K$  以上，金属处于塑性阶段；在  $t_K$  以下，金属处于弹性阶段。

这样的话热应力的形成就可以分为三个部分：

- $\tau_0 - \tau_1$ ：金属都处于塑性变形阶段，收缩引起的热应力会通过塑性变形消除。此时 **无应力产生**
- $\tau_1 - \tau_2$ ：**厚壁金属**由于比较厚因此冷却的比较慢，还处于塑性变形阶段，**薄壁部分**处于弹性变形阶段。薄壁金属短收到压应力，厚壁金属收到压应力。但由于还是有塑性变形，因此依然**无应力产生**
- $\tau_2 - \tau_3$ ：两者都进入弹性变形阶段。不过薄壁的变形变完了，厚壁部分还有一些要变形的部分，因此此时厚壁部分收缩量大于薄壁部分。厚壁部分收到拉应力，薄壁部分受到压应力。

消除铸件中残余热应力的方法是 **时效处理**

## 机械应力

铸件在收缩过程中 **受到铸件或型芯阻扰** 造成的应力

防止措施

- 工艺上：采用合理的铸造工艺，使其 **同时凝固** 原则
- 造型上：采取措施减小铸造应力（合理设置冒口等）
- 结构上：尽量避免牵制到收缩的结构（是结构尽量对称，壁厚尽量均匀）
- 去应力退火

消除铸件中残余热应力的方法是 **及时落砂**

## 变形

具有残余应力的铸件是不稳定的，它将自发地通过变形来减缓其内应力，以便趋于稳定状态。

原来受拉伸部分产生压缩变形、受压缩部分产生拉伸变形，才能使残余内应力减小或消除。

**厚部、心部受拉应力，出现内凹变形；薄部、表面受压应力，出现外凸变形**

例如下图：

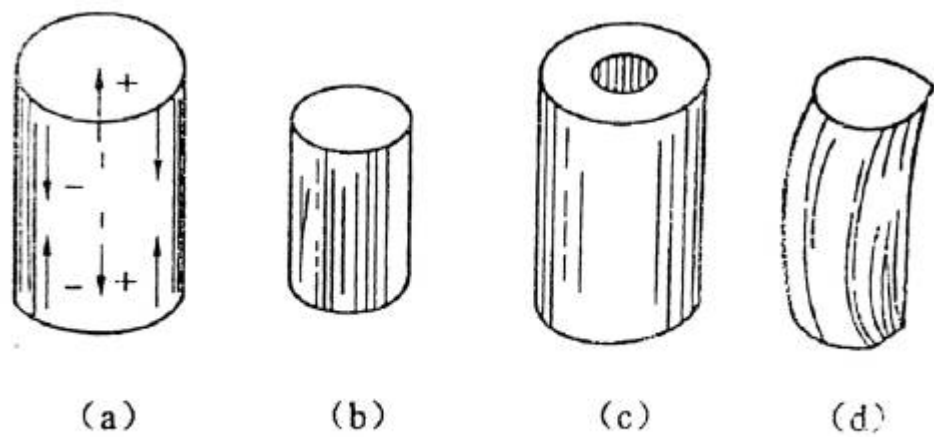


图 5-18 圆柱体铸件变形示意图

代号	加工方式	结论	解释
b	去除外表面	铸件变短	由外表面引起的心部拉应力减少，铸件变短
c	去除心部	铸件变长	由心部引起的外表面压应力减少，铸件变长
d	从侧面切一层	铸件变弯	中间厚两边薄，中间受到拉应力，两边受到压应力，铸件要恢复因此中间往回缩，两边往外开，就变弯了

一定要掌握的

[MOOC]问答

- 某厂采用树脂砂砂型铸造生产新能源铝合金电机壳体，生产中发现铸件上部出现气孔缺陷，为消除此类缺陷，可以采取的措施有哪些？

铸件上部出现气孔缺陷，说明这是 **侵入气孔**。

预防侵入气孔的方法有：**降低型砂的发气量**和**增加铸型的排气能力**

常用合金铸件的生产

铸铁件的生产

C 在 铸铁中主要以两种形式存在： $Fe_3C$  (**渗碳体**)和 **石墨**(游离碳)

有以下分类：

名称	主要成分	力学性能	牌号
白口铸铁	$Fe_3C$	硬而脆，很差	-
麻口铸铁	一部分 $Fe_3C$ ，一部分石墨	介于上下之间	-
普通灰口铸铁	片状石墨	硬度低塑性差，但铸造性能好	ZT
可锻铸铁	团絮状石墨	韧性塑形好	KTH、KTZ
球墨铸铁	球状石墨	强度塑性比可锻铸铁高	QT
蠕墨铸铁	蠕虫状石墨	同时有普通灰口铸铁和球墨铸铁的性质	-

由于有了石墨，铸铁有很多铸钢没有的性质：

- 良好的铸造性能，流动性大，收缩小
- 良好的切削加工性能
- 耐磨性好
- 良好的吸振缓冲性能
- 低的缺口敏感性

PPT中标红

## 石墨化

石墨化：石墨析出的过程。

从上面可以看出，石墨对铸铁件的力学性能影响很大，石墨的形态与数量是关键

由于 C 在铸铁中由 石墨 和  $Fe_3C$  构成，因此根据  $Fe_3C$  的不同，可以将灰口铸铁分为：铁素体灰铸铁（全部为石墨）、铁素体-珠光体灰铸铁（化合碳<0.8%）、珠光体灰铸铁（化合碳0.8%）

影响石墨化的因素：

- 化学成分

C 和 Si 的含量对石墨化影响是其决定性的。C是形成石墨化的元素，Si 是强烈促进石墨化的元素。含 C、Si 量越多，石墨越粗大，基体 F 增加，P 减少。

P 也会促进石墨化，但是一旦多了就会出现冷脆性

S 会抑制石墨化，属于有害元素
- 冷却速度

冷却速度减缓，会促进石墨化

当其他条件一定时，壁厚越大，金属冷却速度越大，石墨化倾向大，会形成粗大的铁素体和石墨，导致铸铁强度，硬度的下降。不过当壁厚小到一定程度时，无法进行，会形成白口组织

## 灰口铸铁

灰口铸铁的性能不仅取决于化学性能，还取决于铸件的壁厚，因此牌号用 **力学性能** 来表示。用 HT××× 表示，后面的三位数字表示其抗拉强度。铸件设计时，应该根据铸件的平均壁厚选择。

灰口铸铁力学性能较差，几乎没有塑性，抗拉能力较差，但是抗压能力还可以；有着良好的铸造性和切削加工性能（石墨润滑）；良好的耐磨性、减震性，缺口敏感性好。

## 孕育处理

普通灰铸铁的主要缺点是**粗大的石墨片**严重地割裂金属基体，致使铸铁**强度低**。实践证明，提高灰铸铁抗拉强度最有效的途径是：对出炉铁液进行**孕育处理**再行浇注。

孕育处理是向含C、Si量少的Fe中加入孕育剂（促进石墨化）。常用的孕育剂为：**含Si量为75%的硅铁合金**。硅铁加入量为铁水质量的0.25%-0.60%。

孕育处理后的金属组织特点为：细小的P晶粒上附着着细小的石墨片。相比于普通的灰口铸铁，孕育处理后的铸铁[孕育铸铁]，强度硬度耐磨性好，但是铸造性能下降

## 可锻铸铁

（不可锻造）**可锻铸铁是将白口铸铁经过长时间高温退火得到的一种高塑性和高韧性的铸铁**。根据退火工艺不同，可分为三种。

- 黑心可锻铸铁（KYH×××-××）  
 $Fe_3C$ 全部分解为团絮状石墨，基体为铁素体
- 珠光体可锻铸铁（KYZ×××-××）  
退火时速度比较快，共析渗碳体未完全石墨化，组织为珠光体基体附着团絮状石墨
- 白心可锻铸铁  
白口坯件在氧化氛围脱碳退火得到，组织与钢相近心部为铁素体+团絮状石墨

注：牌号后面第一组数符表示最小抗拉强度值，第二组数符表示最小延伸率值。球墨铸铁同

制造自来水管的弯头、接头、三通应选用 **可锻铸铁**

## 球墨铸铁

球墨铸铁是通过浇注前向铁水加入一定量**球化剂**和**孕育剂**，以促进碳呈球状石墨结合，从而获得一种高强度和良好塑形的铸铁。

### 生产特点

- 严格控制化学成分（C、Si高；S、P低）
- 较高的出铁温度
- 进行球化处理（作用是使石墨呈球状析出）
- 进行孕育处理（作用是促进石墨化）

球墨铸铁保留了灰口铸铁的优良特性而且焊接性能和热处理性能也比其他灰口铸铁好。不过铸造性能比灰口铸铁差

### 热处理

- **退火**（可以得到铁素体球墨铸铁）
- **正火**（可以得到珠光体球墨铸铁）

## 蠕墨铸铁

有灰口铸铁和球墨铸铁的一系列优点，而且热疲劳性能好（>>球墨），壁厚敏感性好（>>灰口）

# 铸钢

优点是：力学性能高（塑性韧性高），焊接性能优良

缺点是：铸造性能、减震性和切口敏感性比铸铁差

# 有色金属

略

# 砂型铸造

## 造型方法的选择

在砂型铸造中，造型和造芯是最基本的工序。根据造型生产方法的特点，通常分为 **手工造型** 和 **机器造型** 两大类。

### 手工造型

- 按砂箱特征分类

造型方法	分型面
两箱造型	各类模样，可机器造型
多箱造型	一般用于铸件中间截面较两端小的情况

- 按模样特征分  
课件上的比较好，这里就不说了

## 浇注位置的选择

- 铸件的重要工作面、主要加工面应该朝下或侧立放置 气孔、缩孔容易出现在铸件的上方
- 铸件的大平面应朝下，以免形成夹渣和夹砂等缺陷。
- 应将铸件薄而大的平面放在下部、侧面或倾斜位置，以利于合金液填充铸型。
- 铸件厚大部分应该放在上面或侧面，方便安放冒口

核心重点

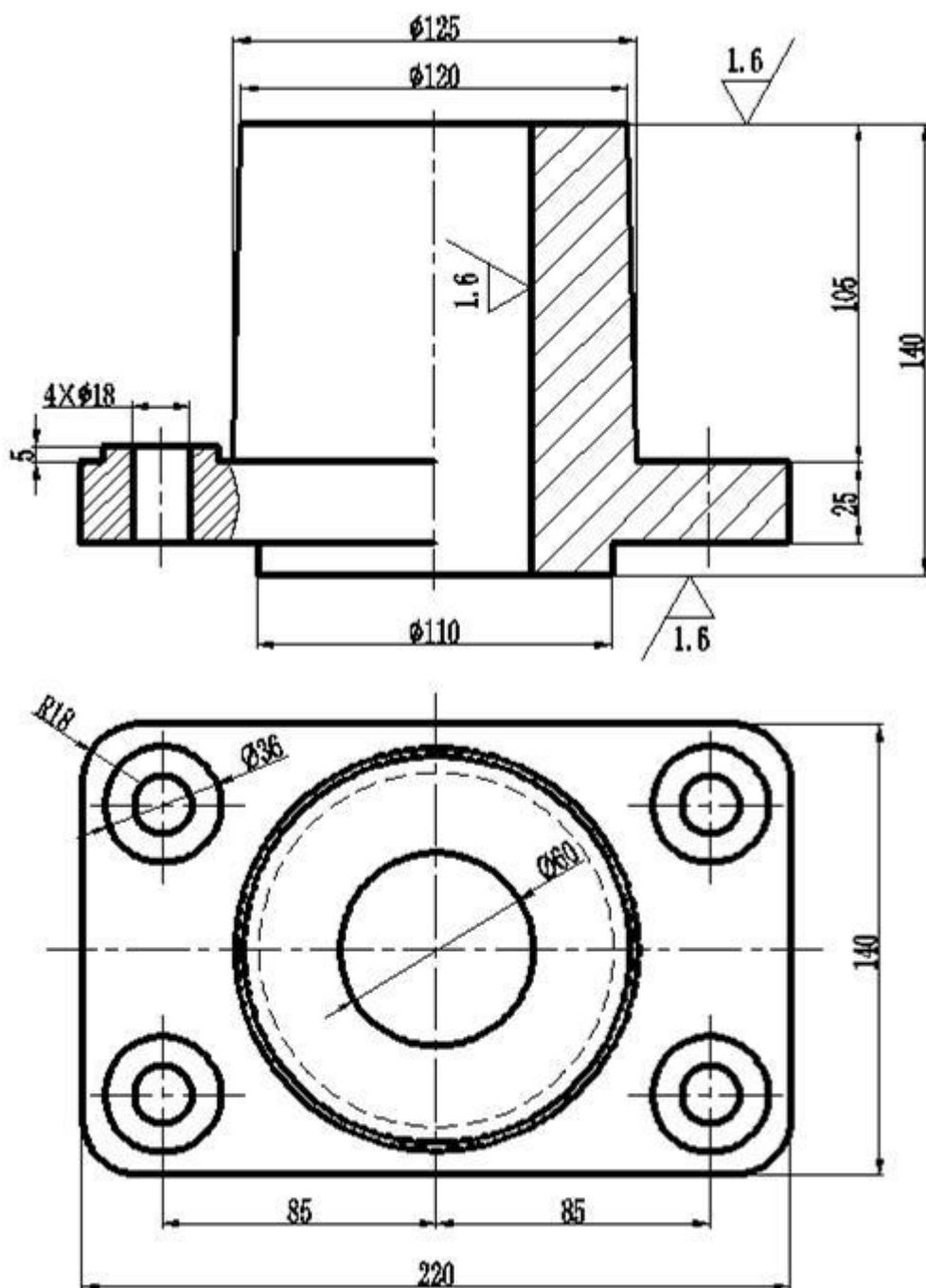
## 分型面的选择

- 应保证模样能顺利从铸型中取出。
- 应尽量减少分型面的数量。
- 应尽量使分型面是一个平直的面。
- 应尽量使型芯和活块的数量减少。
- 应使全部或大部分铸件，或加工基准面与重要的加工面处于同一半型内，以防止错型。

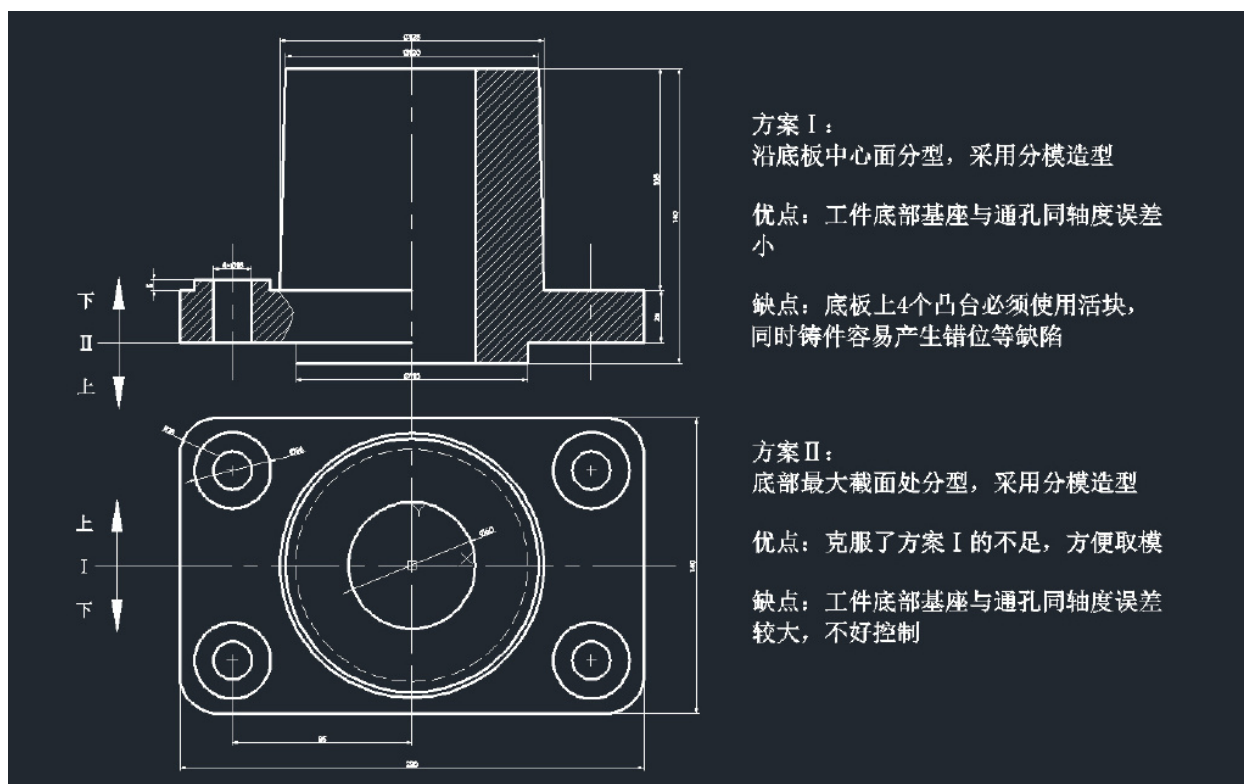
核心重点

- 例题

答案：







## 铸造工艺参数的选择

### 机械加工余量和铸孔

设计铸造工艺图时，为铸件预先增加要切去的金属层厚度，称为机械加工余量。

机械加工余量与以下内容有关：

- 合金种类  
铸钢件的表面粗糙，加工余量应该更大；有色金属价格昂贵，表面光洁，其加工余量较小
- 铸件尺寸  
铸件尺寸越大，机械加工余量越大
- 加工面位置  
浇注时朝上的表面缺陷多，其加工余量比底面和侧面大

铸孔：铸件上的孔、槽是否需要铸出，不仅要考虑工艺上的可能性，尤其应结合 **铸件的批量分析其必要性**。（一般大孔铸出，小孔不铸）

### 铸造收缩率

由于合金在冷却过程中要发生 **固态收缩(线收缩)**，这将使铸件各部分尺寸小于模样原来的尺寸，因此，为了使铸件冷却后的尺寸与铸件图示尺寸一致，则需要在模样或芯盒上加上其收缩的尺寸。

$$K = \frac{L_0 - L}{L_0} \times 100\%$$

其中， $L_0$  为模样尺寸， $L$  为铸件尺寸

## 拔模斜度

为了在造型和制芯时便于起模而不致损坏砂型和砂芯，凡垂直于分型面的立壁，在**制造模型**时，必须留出一定的倾斜度，此斜度称为**拔模斜度**。（不是设计）（垂直壁越高，斜度越小）

## 铸造圆角

制造模型和设计铸件时，壁的连接和转角处都要做成圆弧过渡，称为铸造圆角。

有时零件上并不需要圆角，为了铸造工艺的需要，也要做成圆角，但铸型分型面处则不宜做成圆角。

## 冒口与冷铁

冒口的作用：

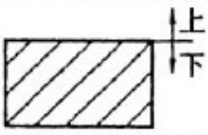
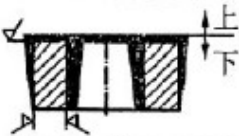
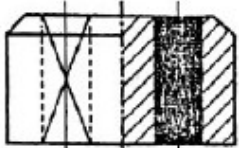
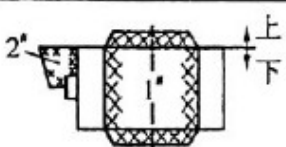
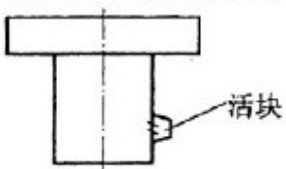
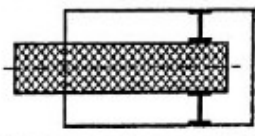
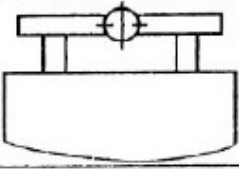
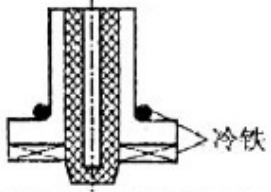
- 在凝固期间进行补缩
- 调节冷却速度

冷铁的作用：

- 调节冷却速度，改变凝固顺序
- 减少冒口数量，增加金属利用率
- 在无法安放冒口的地方起到同样的作用
- 消除局部热应力

\*

表 7-6 铸造工艺图中符号及其表示方法

名 称	符 号	说 明
分型面		用箭头和红线或蓝线表示
机械加工余量		用红线画出轮廓,剖面处全涂以红色(或细网纹格),加工余量值用数字表示,有起模斜度时,一并画出
不铸出的孔和槽		用红色“×”表示,剖面处涂以红色(或以细网格表示)
型芯		用蓝线画出芯头,注明尺寸,不同型芯用不同剖面线,型芯应按下芯顺序编号
活块		用红线表示,并注明“活块”
型芯撑		用红色或蓝色表示
浇注系统		用红线画出,并注明主要尺寸
冷铁		用绿色或蓝色画出,注明“冷铁”

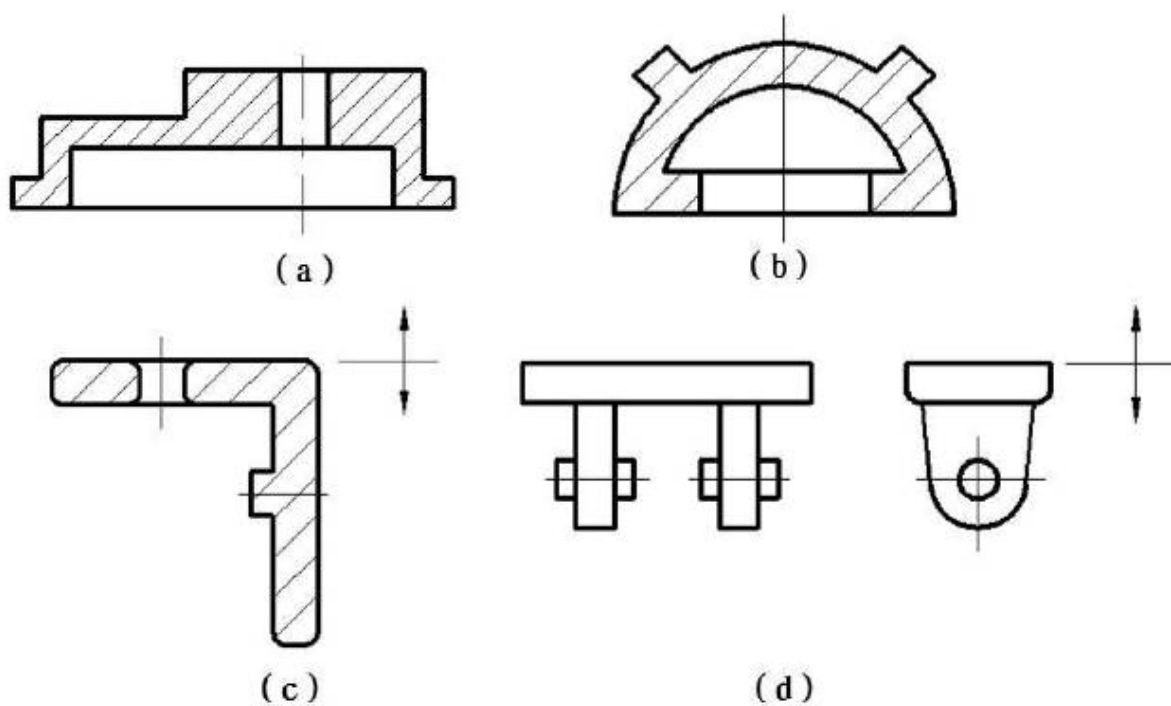
## 铸件的结构设计

- 避免外部侧凹
- 肋板、凸台设计考虑起模方便
- 尽量避免或减少型腔
- 应该避免封闭内腔
- 铸件要有结构斜度 (斜度值较大)
- 应该合理设计壁厚
- 铸件连接处应该有圆角
- 铸件厚薄不一致时, 力求平缓过渡

- 减少交叉和锐角
- 避免大的平面（不利于金属液的填充，易发生浇不足、冷隔等现象）

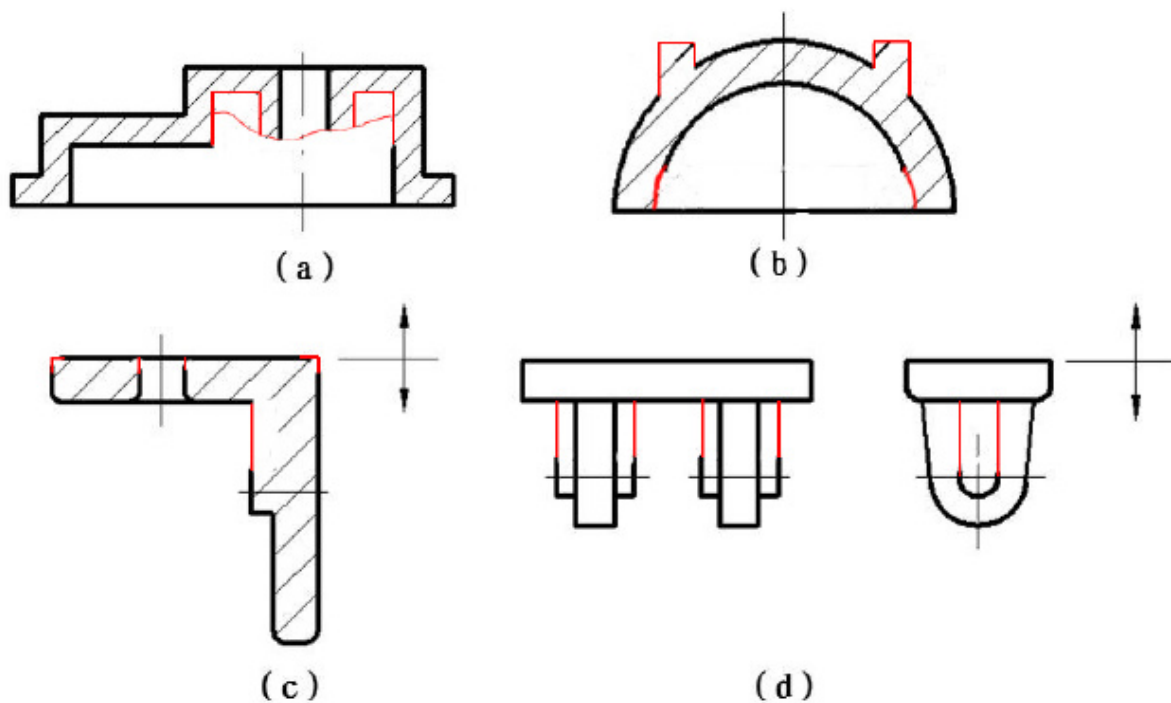
#### 例题

3. 指出图中所示铸件结构有何缺点？如有缺点，请画出正确的铸件结构。



答案：

3. 指出图中所示铸件结构有何缺点？如有缺点，请画出正确的铸件结构。



- a: 壁厚相差太大
- b: 凸台和筋条结构应便于起模。
- c: ①分型面处不应该设置圆角②凸台应便于起模
- d: 凸台应便于起模

## [MOOC]问答

- 某工厂用T10钢制造的钻头给一批铸铁件钻10mm深孔，钻几个孔以后钻头很快就磨损，经检验，钻头的材质、热处理工艺、金相组织、硬度均合格，试问失败原因，并请提出解决办法。

失败原因：①铸件产生麻口或白口组织，硬度过高，使钻头磨损 ②铸件表面有粘砂

解决办法：①退火处理，消除铸件麻口或白口组织 ②将铸件表面磨一下，去除表面粘砂

## 特种铸造

## [MOOC]问答

- **挤压铸造** 生产铝连杆铸件，铸件晶粒最小
- **砂型铸造** 可以用来生产大型铸件
- 热烈倾向大的合金 **不适用** 于金属型铸造。
- 压铸件**不能**进行热处理或在高温下工作。

- 如铸件有致密度要求，如用压力铸造方法生产能否满足要求？什么是真空压铸？

**不能**，因为铸件内部组织疏松，而且内部存在气孔，缩孔和缩松等缺陷。

真空压铸是通过在压铸过程中 **抽除压铸模具型腔内的气体** 而消除或显著减少铸件内的气孔和溶解气体，从而提高铸件力学性能和表面质量的先进压铸工艺。（百度百科）