

# 工程材料

## 说明

1. 本提纲由 智造钱2201 李祎航 编写，内容仅适用于智造钱课程《工程材料及成形技术基础》的工程材料部分。
2. 编写仓促，未进行校对，请同学们结合ppt和课本使用。
3. 上课未讲的知识点（其中 CH1 部分未讲过内容出现在提纲中）：
  1. CH1 第三节—第七节
  2. CH2 第四节—第七节
  3. CH3
    1. 第四节 2 3 钢的碳氮共渗
    2. 第五节全部
  4. CH4 :
    1. 第二节 六 超高强度钢
    2. 第三节 三 新型合金工具钢
    3. 第四节 一 3 常用镍基耐蚀合金及其热处理
    4. 第四节 二 3 常用高温合金及其热处理
  5. CH5 全部
  6. CH6
    1. 第二节全部
    2. 第三节 二 2 铸造铜合金
    3. 第五节 二 2 3
    4. 第六节全部

## CH1 机械零件的失效分析

1. 零件的功能和失效：
  1. 零件的功能：在一定的压力、温度、介质下：保持形状和尺寸；实现规定的机械运动；传递力和能。
  2. 零件的失效：失去设计所要求的效能，过量变形、断裂、磨损、腐蚀

## 1.1 零件在常温静载下的过量变形

### 1.1.1 工程材料在静拉伸时的应力-应变行为

#### 1. 低碳钢的应力-应变行为

1. 四个阶段：弹性变形、屈服塑性变形、均匀塑性变形、不均匀集中塑性变形
2. 材料：低碳钢、中碳钢、中碳合金钢、部分铝合金、高分子材料

#### 2. 其他类型材料的应力-应变行为

1. 纯金属：三个阶段：弹性变形、均匀塑性变形、不均匀集中塑性变形
2. 脆性材料：一个阶段：线弹性变形
3. 高弹性材料：一个阶段：非线性的弹性变形

### 1.1.2 静载性能指标

#### 1. 刚度和强度指标

1. 刚度：指构件受力时抵抗弹性变形的能力，等于材料弹性模量与截面面积的乘积。

$$\text{单向拉压时: } E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A}{\varepsilon}, \text{ 即 } EA = \frac{F}{\varepsilon}$$

$$\text{纯剪切时: } G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{F_{\tau}/A}{\gamma}, \text{ 即 } GA = \frac{F_{\tau}}{\gamma}$$

因此，弹性模量E或切变模量G是表征材料刚度的指标。

2. 强度：指材料抵抗变形或断裂的能力，比例极限 $\sigma_p$ ，弹性极限 $\sigma_e$ ，屈服强度 $R_{eL}$ ，抗拉强度 $R_m$ ，断裂强度 $\sigma_R$ 。

#### 2. 弹性和塑性指标

1. 弹性：指材料弹性形变的大小，用弹性变形时吸收的弹性能 $u$ 表示。
2. 塑性：指材料断裂前发生塑性变形的能力，用断后伸长率 $A$ 和断面收缩率 $Z$ 表示。

#### 3. 硬度指标

1. 表征材料软硬程度的一种性能
  1. 划痕法：表征对切断的抗力（莫氏硬度）
  2. 弹性回跳法：表征弹性变形功的大小（肖氏硬度）

3. 压入法：表征塑性变形抗力和应变硬化能力（布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度）

### 1.1.3 过量变形失效

#### 1. 过量弹性变形及其抗力指标

##### 1. 发生过量弹性变形就会造成失效：

1. 刚度设计：规定零件的最大弹性变形量  $\Delta l$  或扭转角  $\theta$  必须小于许可的弹性变形量  $[\Delta l]$  或  $[\theta]$ 。
2. 失效：若弹性变形量或扭转角超过许可的弹性变形量或扭转角，就造成过量弹性变形失效。

##### 2. 抗力指标：

1. 弹性模量  $E$  和切变模量  $G$  是材料抵抗弹性变形的性能指标
2. 金属材料的  $E$  取决于基体金属的性质，对成分和显微组织不敏感；
3. 陶瓷材料、高分子材料、复合材料的  $E$  对成分和组织是敏感的，可以通过改变成分和工艺提高。

#### 2. 过量塑性变形及其抗力指标

##### 1. 失效：塑性变形超过允许量。

##### 2. 抗力指标：

1. 比例极限、弹性极限、屈服强度；
2. 条件比例极限、条件弹性极限、条件屈服强度；
3. 各个极限对材料成分和组织敏感，可以通过合金化、热处理、冷变形等手段提升。

## 1.2 零件在静载和冲击载荷下的断裂

### 1.2.1 韧断和脆断的基本概念

#### 1. 断裂：材料在应力作用下分为两个或两个以上部分的现象：

1. 韧性断裂：断裂前发生明显宏观塑性变形；
2. 脆性断裂：不发生塑性变形，断口齐平，由无数发亮小平面组成。

#### 2. 断裂过程包含裂纹形成和扩展两个阶段：

1. 形成：在外力作用下形成微裂纹或以内部缺陷作为裂纹源；

## 2. 扩展:

1. 将裂纹自形成到扩展至临界长度的过程称为裂纹亚稳扩展阶段:

1. 扩展阻力大、速度慢

2. 把裂纹达到临界长度后的扩展阶段称为失稳扩展阶段:

1. 扩展阻力小、速度快 (能达到音速)

## 3. 两种断裂:

1. 韧性断裂: 裂纹形成后经历很长的亚稳扩展阶段, 裂纹扩展与塑性变形同时进行, 变形停止则裂纹扩展停止;

2. 脆性断裂: 几乎不经历亚稳扩展阶段就进入裂纹失稳扩展阶段, 无明显塑性变形。

4. 韧性表示材料在塑性变形和断裂过程中吸收能量的能力, 是材料强度和塑性的综合表现。

## 1.2.2 冲击韧性及衡量指标

1. 冲击韧性: 评定材料在冲击载荷作用下的脆断倾向, 指材料在冲击载荷作用下吸收塑性变形功和断裂功的能力, 用冲击吸收功  $A_K(J)$  表示, 也可用冲击韧度  $a_K(= A_K/F_K)(J \cdot cm^{-2})$  表示。 ( $F_K$  为变形前的断口处截面积)

2. 材料的冲击吸收功随温度降低而降低。冲击吸收功急剧变化的温度  $T_K$  称为韧脆转变温度。  $A_K$  越高,  $T_K$  越低, 材料的冲击韧性越好。

3.  $A_K$  对材料成分和组织敏感, 可以通过合金化和热处理等手段改善。

## 1.2.3 断裂韧性及衡量指标

1. 冲击韧性和塑性指标不能衡量材料的低应力脆断

2. 断裂韧度  $K_{IC}$  是材料抵抗裂纹失稳扩展的能力, 单位为  $MPa \cdot m^{1/2}$ 。

## 1.2.4 影响脆断的因素

1. 加载方式: 应力状态影响脆化

2. 材料本质

3. 温度: 降低温度脆化

4. 加载速度：增加速度脆化
5. 应力集中：应力集中引起脆化
6. 零件尺寸：截面尺寸越大越容易脆断

## 1.3 零件在交变载荷下的疲劳断裂

### 1.3.1 疲劳的基本概念

1. 交变载荷：载荷的大小、方向随时间发生周期性变化的载荷
2. 疲劳断裂：零件在交变载荷下经过长时间的工作而发生断裂的现象
  1. 疲劳断裂的应力很小；
  2. 无明显宏观塑性变形；
  3. 疲劳端口能显示出裂纹的形成、扩展、最后断裂的三个阶段。

### 1.3.2 疲劳端口的特征

疲劳断裂经历裂纹形成、扩展和最后断裂三个阶段；断口形貌由疲劳源区、裂纹扩展区、最后断裂区三部分组成。

1. 疲劳源区：由于内部缺陷等造成局部应力集中，即为疲劳裂纹产生地；
2. 疲劳裂纹扩展区：裂纹经多次张开、闭合及表面的相互摩擦，留下一条条光亮的弧线（疲劳裂纹前沿线、疲劳线），形成“贝壳状”或“海滩状”的花样；
3. 最后断裂区：放射状的断裂区。

疲劳端口取决于载荷类型、应力大小、应力集中程度；载荷类型一定时，可根据最终断裂区相对面积大小和位置判断零件所受应力大小和应力集中程度：
4. 面积大、中心位置：高的名义应力和大的应力集中：疲劳寿命短；
5. 面积小、表面位置：低的名义应力和小的应力集中：疲劳寿命长。

### 1.3.3 疲劳抗力指标及其影响因素

0. 疲劳分类：
  1. 疲劳前无裂纹：无裂纹零件疲劳：裂纹形成、扩展和最后断裂三个阶段

## 2. 疲劳前有裂纹：带裂纹零件疲劳：裂纹扩展和最后断裂两个阶段

### 1. 无裂纹零（构）件的疲劳抗力指标：

1. 疲劳极限  $\sigma_r$ ：疲劳曲线水平部分对应的应力，表示材料经过无限多次应力循环也不会断裂的最大应力， $r$  为应力比。
2. 过载持久值：疲劳曲线的斜线部分反应材料对过载的抗力，指材料在高于疲劳极限的应力作用下发生疲劳断裂的应力循环周次。
  1. 材料的疲劳曲线常用旋转弯曲疲劳试验方法测定， $r = -1$ ；
  2. 疲劳曲线上没有水平部分时，规定某一循环周次  $N_0$  对应的应力作为“条件疲劳极限”。
3. 疲劳缺口敏感度：零件台阶、键槽处的应力集中使得缺口对材料疲劳极限具有影响。疲劳缺口敏感度  $q$ ：

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1}$$

其中  $K_t = \sigma_{max}/\sigma_m$  为理论应力集中系数，仅取决于缺口几何形状，与材料无关； $K_f = \sigma_{-1}/\sigma_{-1N}$  为有效应力集中系数，既与缺口集合形状有关，又与材料特性有关。

1. 当  $q \rightarrow 0$  时， $K_f \rightarrow 1$  即  $\sigma_{-1N} \rightarrow \sigma_{-1}$ ，表示缺口不降低疲劳极限，即对缺口不敏感；
2. 当  $q \rightarrow 1$  时， $K_f = K_t$ ，表示缺口严重降低疲劳极限，即对缺口十分敏感；
3. 因此希望材料的  $q$  越小越好。

### 2. 带裂纹零（构）件的疲劳抗力指标：

1. 疲劳裂纹扩展速率  $\frac{da}{dN}$ ：不仅与应力幅  $\Delta\sigma$  有关，也与裂纹长度  $a$  有关；
2. 疲劳裂纹扩展门槛值  $\Delta K_{th}$ ：交变应力作用下裂纹不扩展的最大应力场强度因子幅值，表示材料阻止疲劳裂纹扩展的能力。
3.  $\Delta K_{th}$  和  $\sigma_r$  有相似之处，但前者表示阻止裂纹扩展的能力，后者表示阻止裂纹产生的能力。

### 3. 影响疲劳抗力的因素：

1. 载荷类型：应力状态
2. 材料本质
3. 零件表面状态：
  1. 零件在冷、热加工过程中所产生的缺陷均使疲劳极限降低；
  2. 材料的强度越高，表面加工质量对疲劳极限的影响越大；

3. 零件承受交变弯曲或交变扭转时，表面应力最大，因此着重提高材料表面强化（渗碳、渗氮、表面淬火）。
4. 工作温度：
  1. 高温降低屈服强度，降低疲劳极限；
  2. 低温提高屈服强度，提高疲劳极限，但增加缺口敏感度。
5. 腐蚀介质：零件在腐蚀介质中工作，表面腐蚀成为裂纹源，降低疲劳极限。

## 1.4 零件的磨损失效

磨损：在摩擦过程中零件表面发生尺寸变化和物质损耗的现象

### 1.4.1 磨损的基本类型

磨损常见的类型有：粘着磨损、磨粒磨损、腐蚀磨损、麻点磨损（接触疲劳）

1. 粘着磨损：又称咬合磨损，是指滑动摩擦时摩擦副接触面局部发生金属粘着，在随后相对滑动中粘着处被破坏，有金属屑粒从零件表面被拉拽下来或零件表面被擦伤；在滑动摩擦时，力学性能相差不大的两种金属之间发生的最常见的磨损形式，磨损速度大，具有严重的破坏性。
2. 磨粒磨损：又称磨料磨损，是指滑动摩擦时，零件表面摩擦区存在硬质颗粒，使得磨面发生局部塑性变形、磨粒嵌入、被磨粒切割等过程，以至磨面材料逐渐损耗的一种磨损。磨损速度较大。
3. 腐蚀磨损：在摩擦力和环境介质联合作用下，金属表层的腐蚀产物剥落与金属磨面见的机械腐蚀相结合的一种磨损。
  1. 氧化磨损：氧化膜不断自金属表面脱离又反复形成，造成金属表面物质不断损耗的过程；磨损速度较小，是工程上唯一允许的磨损；
  2. 微动磨损：在机器的嵌合部位，配合面由于外部交变载荷的作用发生微小的相对滑动，产生粉末状磨损产物；兼有氧化磨损、磨粒磨损、粘着磨损的作用，形成一定深度的磨痕蚀坑，又称咬蚀。
  3. 冲蚀磨损
  4. 腐蚀气氛磨损

### 1.4.2 接触疲劳

接触疲劳又称麻点磨损、疲劳磨损，是指零件在滚动或滚动滑动摩擦时，在交变接触应力的长期作用下引起的一种表面疲劳剥落破坏，而使物质损耗的现象，表现为接触表面上出现许多针状或痘状的凹坑，称为麻点。接触疲劳也是裂纹形成和扩展的过程

1. 裂纹源于表层的麻点剥落：零件在滚动并有滑动，表面有沿滚动方向的摩擦力，并有润滑油存在的情况下产生；
2. 裂纹源于次表层的麻点剥落：零件在几乎纯滚动或表面光洁、摩擦力很小的情况下产生；
3. 硬化层剥落：只发生在经过表面硬化处理的零件上。

### 1.4.3 提高零件磨损抗力的途径

减少接触压力和摩擦系数、提高材料硬度、改善润滑条件

1. 粘着磨损：
  1. 合理选择摩擦副配对材料：异类材料、多相合金、大硬度差、金属非金属配合；
  2. 表面处理减少摩擦系数提高硬度：蒸汽处理、磷化、渗硫、渗氮、渗碳、表面淬火；
  3. 减少接触压应力：必须小于 $1/3\text{HBW}$ ；
  4. 减少表面粗糙度值：但当表面粗糙度过小时，润滑油难以附着。
2. 磨粒磨损：
  1. 高硬度材料；
  2. 表面处理：表面硬度不必超过磨粒硬度的1.3倍。
3. 氧化磨损：
  1. 磨损速度取决于氧化膜的性质、氧化膜与基体的结合力、金属表层塑性变形抗力；
  2. 提高硬度、形成牢固结合的致密氧化膜。
4. 微动磨损：
  1. 采用垫衬；
  2. 减小应力集中。
5. 接触疲劳：
  1. 提高硬度；
  2. 提高材料纯净度；

3. 提高零件心部硬度；
4. 减少表面粗糙度；
5. 提高润滑油的粘度。

## CH2 碳钢

### 2.1 纯铁的组织性能

#### 2.1.1 纯铁的结晶

##### 1. 过冷现象和过冷度：

1. 结晶：物质从液体转变为晶体的过程
2. 平衡结晶温度  $T_0$ ：结晶速度与熔化速度相等的温度
3. 过冷现象：实际结晶温度  $T_n$  总小于平衡结晶温度  $T_0$
4. 过冷度： $\Delta T = T_0 - T_n$
5. 过冷度不是恒定值：冷却速度越快，过冷度越大；物质越纯净，过冷度越大。
6. 过冷度是一切物质结晶的必要条件，温度低于  $T_0$  时，固体自由能小于液体自由能，液体自发结晶为固体，二者自由能差为结晶驱动力。

##### 2. 结晶过程——形核与长大

###### 1. 过程：

1. 自液体中产生一些稳定的微小晶体，称为晶核
2. 晶核长大，同时产生新的晶核
3. 液体全部结晶为固体，形成由许多不规则的晶粒构成的多晶体
4. 每个晶粒均由一个晶核发育而来，相邻晶粒间的界面称为晶界
5. 若一块晶体只由一个晶核长成，则为单晶体

###### 2. 细晶强化：

1. 结晶冷却速度越大，晶核越多，晶粒越细；材料纯度越低，晶核越多，晶粒越细；
2. 金属材料的晶粒越细，其强度越高，塑韧性越好
3. 细晶强化工艺：
  1. 将砂型铸模改为金属型铸模；
  2. 添加人工晶核、形核剂；（称为变质处理、孕育处理）
  3. 搅拌。

## 2.1.2 纯铁的晶体结构

### 1. 晶体结构的概念：

1. 晶体：原子在空间呈规则排列的物体
2. 晶体结构：在空间的具体排列
3. 点阵、晶面、晶向、晶格、晶胞
4. 晶格常数：棱边长度： $a, b, c$ ；棱间夹角： $\alpha, \beta, \gamma$
5. 金属常见的晶体结构：体心立方、面心立方、密排六方
6. 塑性变形能力：面心立方>体心立方>密排六方
7. 单晶体：各向异性；多晶体：伪各向同性

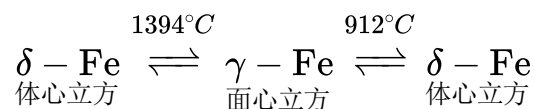
### 2. 晶体缺陷的基本概念：

实际晶体中出现许多原子排列不规则的区域

1. 点缺陷：三个方向均小：空位、间隙原子、杂质原子
2. 线缺陷：一个方向大，两个方向小：位错（刃位错、螺位错）
3. 面缺陷：两个方向大，一个方向小：晶界、亚晶界

1. 晶粒越细，晶界越多，塑韧性强度越好，抗氧化耐高温耐腐蚀越差

### 3. 纯铁的晶体结构及同素异构转变



1.  $\delta$ ：高温铁素体； $\alpha$ ：铁素体； $\gamma$ ：奥氏体
2.  $\gamma \rightleftharpoons \alpha$ 的转变引起溶解碳的能力改变，进而导致组织和性能的改变。

## 2.1.3 工业纯铁的组织 and 性能

1. 组织：少量杂质的 $\alpha - \text{Fe}$ ，体心立方结构，由许多晶粒组成
2. 性能：强度低、塑韧性好；晶粒越细，屈服强度越高，韧脆转变温度越低

## 2.2 铁碳合金中的相和组织组成物

### 2.2.1 铁和碳的相互作用

1. 形成固溶体：铁素体、奥氏体

1. 碳在奥氏体中溶解度大于铁素体
2. 固溶强化：形成固溶体时产生晶格畸变，提高强度，降低塑韧性、导电性
2. 形成化合物：渗碳体 $\text{FeC}_3$ 
  1. 以网状、粗大片状：脆性增加、强度降低
  2. 以细小层片状、球状、极细片状：强化作用

## 2.2.2 铁碳合金中的相和组织组成物

1. 相：系统中具有同一聚集状态、同一化学成分、同一结构并以界面相互隔开的均匀组成部分
2. 铁素体、奥氏体、渗碳体均是基本相，可以独立存在，也可以相互组合形成混合物
3. 组织组成物：构成显微组织的独立部分，可以是单相，也可以是多相混合物；组织组成物的类型、数量、大小、形态、分布不同，就构成不同的显微组织

## 2.3 Fe-Fe<sub>3</sub>C相图

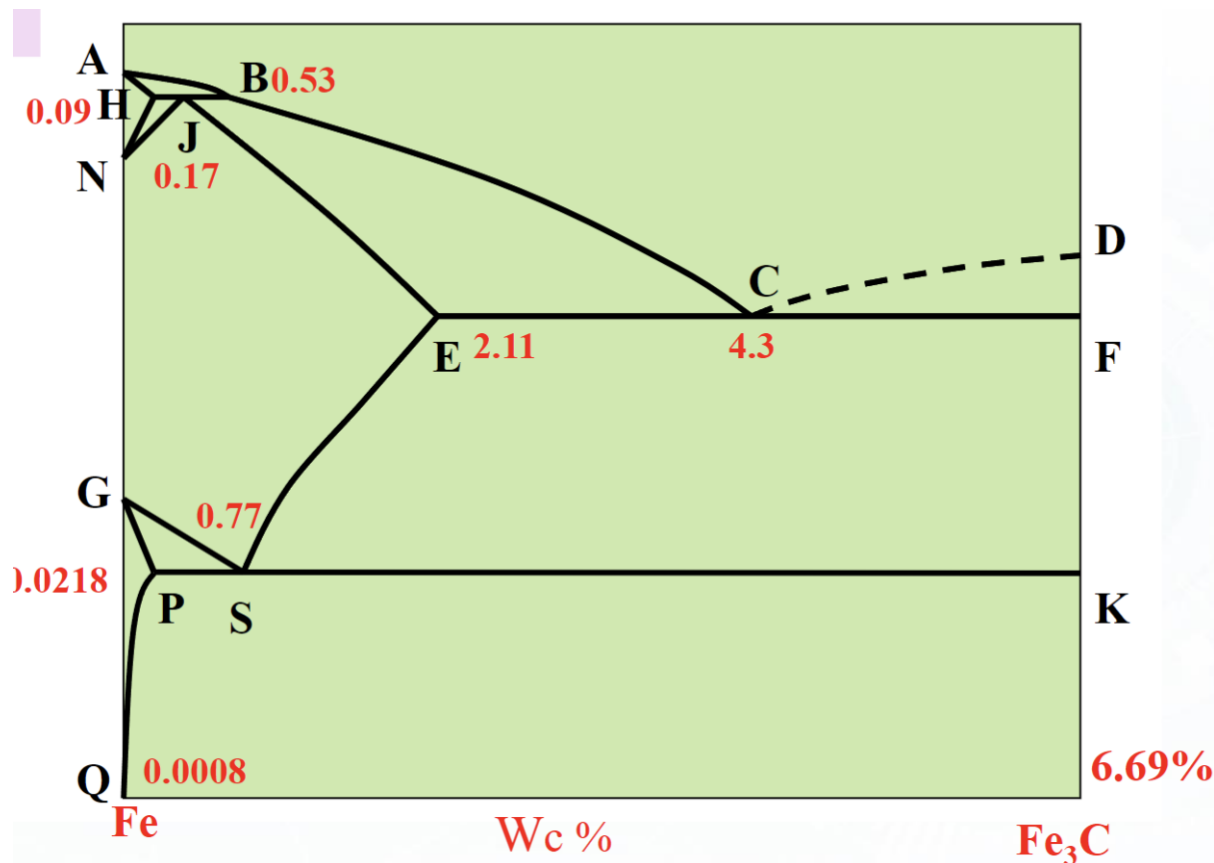
### 2.3.1 相图的基本概念

1. 相图的建立
  1. 相图：表示合金在缓慢冷却的平衡状态下相或组织与温度、成分之间的关系图形，又称状态图或平衡图
  2. 固液转变：匀晶转变；
  3. 晶内偏析：先结晶和后结晶的固溶体的成分不同，又称显微偏析、枝晶偏析
2. 二元相图的杠杆定律

$$\frac{M_L}{M_\alpha} = \frac{rb}{ra}$$

### 2.3.2 Fe-Fe<sub>3</sub>C相图分析

## 1. 相图中的点、线、区



### 1. 点:

点的符号	温度/°C	$\omega_C$ (%)	说明
A	1538	0	纯铁熔点
B	1495	0.53	包晶反应时液态合金的浓度
C	1148	4.30	共晶点,
D	1227	6.69	渗碳体熔点 (计算值)
E	1148	2.11	碳在 $\gamma$ -Fe 中的最大溶解度
F	1148	6.69	渗碳体
G	912	0	同素异构转变点 (A3)
H	1495	0.09	碳在 $\delta$ -Fe 中的最大溶解度
J	1495	0.17	包晶点
K	727	6.69	渗碳体
N	1394	0	同素异构转变点 (A4)
P	727	0.0218	碳在 $\alpha$ -Fe 中的溶解度
S	727	0.77	共析点,
Q	室温	0.0008	碳在 $\alpha$ -Fe 中的溶解度

### 2. 线:

1. ABCD: 液相线
2. AHJECF: 固相线
3. HJB, ECF, PSK: 等温转变线: 包晶转变、共晶转变、共析转变 (PSK线:  $A_1$  线)
4. NH, NJ: 固溶体同素异构转变线:  $\delta \rightarrow \gamma$ , (NJ线:  $A_4$  线)

5. GS, GP: 固溶体同素异构转变线:  $\gamma \rightarrow \alpha$ , (GS线:  $A_3$  线)

6. ES, PQ: 固溶度线, 碳在奥氏体和铁素体中的极限溶解度随温度变化 (ES线:  $A_{cm}$  线)

3. 区:

1. 四个单相区: L、 $\delta$ 、 $\gamma$ 、 $\alpha$ 、(以及  $\text{Fe}_3\text{C}$ : DFK线)

2. 七个两相区: (L +  $\delta$ )、(L +  $\gamma$ )、( $\delta$  +  $\gamma$ )、( $\gamma$  +  $\alpha$ )、(L +  $\text{Fe}_3\text{C}$ )、( $\gamma$  +  $\text{Fe}_3\text{C}$ )、( $\alpha$  +  $\text{Fe}_3\text{C}$ )

3. 三个三相点: J (L +  $\gamma$  +  $\delta$ )、C (L +  $\gamma$  +  $\text{Fe}_3\text{C}$ )、S ( $\alpha$  +  $\gamma$  +  $\text{Fe}_3\text{C}$ )

2. 恒温转变

1. 包晶转变: HJB线:  $\delta_H + \text{L}_B \xrightarrow{1495^\circ\text{C}} \gamma_J$

1. 包晶转变: 在恒温下, 由一种液相和一种固相生成一个新固相

2. 转变产物:

1. J点:  $\gamma$

2. H-J:  $\delta + \gamma$

3. J-B:  $\gamma + \text{L}$

2. 共晶转变: ECF线:  $\text{L}_C \xrightarrow{1148^\circ\text{C}} \gamma_E + \text{Fe}_3\text{C}$

1. 共晶转变: 在恒温下, 由一种液相生成两种固相

2. 转变产物:

1. 共晶:  $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ : 莱氏体 Ld

2. 亚共晶:  $\gamma_{\text{初}} + \text{Ld}$

3. 过共晶:  $\text{Fe}_3\text{C}_I + \text{Ld}$

3. 共析转变: PSK线:  $\gamma \xrightarrow{727^\circ\text{C}} \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$

1. 共析转变: 在恒温下, 一种固相生成两种固相

2. 转变产物:

1. 共析: 珠光体 P ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ )

2. 亚共析: P +  $\alpha_{\text{先共析}}$

3. 过共析: P +  $\text{Fe}_3\text{C}_{II}$

3. 第二相强化: 生成珠光体时析出了第二相, 又称析出强化 存疑

3. 补充

1. 一次渗碳体  $\text{Fe}_3\text{C}_I$ : 从液相生成(1148°C, ECF线), 粗大片状

2. 二次渗碳体  $\text{Fe}_3\text{C}_{II}$ : 从奥氏体晶界析出(727~1148°C), 沿  $\gamma$  晶界的网状

3. 三次渗碳体  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$ : 从铁素体晶界析出( $0\sim 727^\circ\text{C}$ ), 极少, 沿  $\alpha$  晶界的网状
4. 共晶  $\text{Fe}_3\text{C}$ : 莱氏体中的渗碳体, 为莱氏体的基体
5. 共析  $\text{Fe}_3\text{C}$ : 珠光体中的渗碳体

### 2.3.3 典型铁碳合金结晶过程分析

工业纯铁 ( $w_C < 0.0218\%$ )、

钢 ( $0.0218\% < w_C < 2.11\%$ )

亚共析钢 ( $0.0218\% < w_C < 0.77\%$ )

共析钢 ( $w_C = 0.77\%$ )

过共析钢 ( $0.77\% < w_C < 2.11\%$ )

白口铸铁 ( $2.11\% < w_C < 6.69\%$ )

亚共晶白口铸铁 ( $2.11\% < w_C < 4.3\%$ )

共晶白口铸铁 ( $w_C = 4.3\%$ )

过共晶白口铸铁 ( $4.3\% < w_C < 6.69\%$ )

注意: 此处转变过程较为繁琐, 请结合课本, 此处仅给出相和组织组成物的计算

1.  $w_c = 0.01\%$  的工业纯铁:

1. 相:  $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$

$$w_\alpha = \frac{6.69 - 0.01}{6.69 - 0.0008} \quad w_{\text{Fe}_3\text{C}} = \frac{0.01 - 0.0008}{6.69 - 0.0008}$$

2. 组织组成物:  $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$ , 含量同上

2.  $w_c = 0.77\%$  的共析钢:

1. 相:  $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$

$$w_\alpha = \frac{6.69 - 0.77}{6.69 - 0.0008} \quad w_{\text{Fe}_3\text{C}} = \frac{0.77 - 0.0008}{6.69 - 0.0008}$$

2. 组织组成物:  $P (\alpha + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{共析}})$

$$w_P = 1$$

3.  $w_c = 0.4\%$  的亚共析钢:

1. 相:  $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$

$$w_{\alpha} = \frac{6.69 - 0.4}{6.69 - 0.0008} \quad w_{\text{Fe}_3\text{C}} = \frac{0.4 - 0.0008}{6.69 - 0.0008}$$

2. 组织组成物:  $\text{P} + \alpha_{\text{先共析}}$

$$w_{\text{P}} = \frac{0.4 - 0.0218}{0.77 - 0.0218} \quad w_{\alpha_{\text{先共析}}} = \frac{0.77 - 0.4}{0.77 - 0.0218}$$

4.  $w_c = 1.2\%$  的过共析钢:

1. 相:  $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$

$$w_{\alpha} = \frac{6.69 - 1.2}{6.69 - 0.0008} \quad w_{\text{Fe}_3\text{C}} = \frac{1.2 - 0.0008}{6.69 - 0.0008}$$

2. 组织组成物:  $\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$

$$w_{\text{P}} = \frac{6.69 - 1.2}{6.69 - 0.77} \quad w_{\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}} = \frac{1.2 - 0.77}{6.69 - 0.77}$$

5.  $w_c = 4.3\%$  的共晶白口铸铁:

1. 相:  $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$

$$w_{\alpha} = \frac{6.69 - 4.3}{6.69 - 0.0008} \quad w_{\text{Fe}_3\text{C}} = \frac{4.3 - 0.0008}{6.69 - 0.0008}$$

2. 组织组成物: 低温莱氏体  $\text{Ld}'$

$$w_{\text{Ld}} = 1$$

6.  $w_c = 3.0\%$  的亚晶白口铸铁:

1. 相:  $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$

$$w_{\alpha} = \frac{6.69 - 3.0}{6.69 - 0.0008} \quad w_{\text{Fe}_3\text{C}} = \frac{3.0 - 0.0008}{6.69 - 0.0008}$$

2. 两次转变:

1. 在  $1148^{\circ}\text{C}$  发生共晶转变, 生成莱氏体和初生奥氏体, 且初生奥氏体的含碳量为 E 点含碳量:  $w_C = 2.11\%$

2. 在  $727^{\circ}\text{C}$  发生共析转变, 初生奥氏体转变为  $\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$

3. 组织组成物:  $Ld' + P + Fe_3C_{II}$

$$w_{Ld'} = \frac{3 - 2.11}{4.3 - 2.11} \quad w_P + w_{Fe_3C_{II}} = \frac{4.3 - 3}{4.3 - 2.11} \quad \frac{w_P}{w_{Fe_3C_{II}}} = \frac{6.69 - 2.11}{2.11 - 0.77}$$

7.  $w_c = 5.0\%$  的过晶白口铸铁:

1. 相:  $\alpha + Fe_3C$

$$w_\alpha = \frac{6.69 - 5.0}{6.69 - 0.0008} \quad w_{Fe_3C} = \frac{5.0 - 0.0008}{6.69 - 0.0008}$$

2. 组织组成物:  $Ld' + Fe_3C_I$

$$w_{Ld'} = \frac{6.69 - 5.0}{6.69 - 4.3} \quad w_{Fe_3C_I} = \frac{5.0 - 4.3}{6.69 - 4.3}$$

## 2.3.4 碳对铁碳合金的影响

1. 平衡组织

1. 对组织组成物有影响;
2. 对渗碳体的数量、分布和形态产生影响;

2. 力学性能

1. 铁素体软、韧; 渗碳体硬、脆; 珠光体兼具两者的优点
2. 不同形态的渗碳体影响不同: 细小的层片状和球状渗碳体可以改善钢的力学性能, 而网状和粗大片状的渗碳体导致钢硬度下降, 脆性增加

## 2.3.5 Fe-Fe<sub>3</sub>C相图的应用

1. 为选材提供成分依据
2. 为热加工工艺提供成分依据
3. 详见p60, 此略

## CH3 钢的热处理

热处理是改善金属材料性能的一种重要加工工艺: 在固态下通过加热、保温、冷却(最重要)的方法, 改变合金的内部组织, 从而获得所需性能。

## 3.1 钢在加热时的转变

$A_1$  线：P-S-K线：珠光体向奥氏体转变的开始温度

$A_3$  线：G-S线：亚共析钢向奥氏体转变的开始温度：珠光体 → 奥氏体 + 先共析铁素体 → 奥氏体

$A_{cm}$  线：S-E线：过共析钢向奥氏体转变的开始温度：珠光体 → 奥氏体 + 先共析渗碳体 溶入 奥氏体

$Ac_1$  线：珠光体完成向奥氏体转变的最低温度

$Ac_3$  线：亚共析钢完成向奥氏体转变的最低温度

$Ac_{cm}$  线：过共析钢完成向奥氏体转变的最低温度

### 3.1.1 奥氏体的形成

#### 1. 形成过程：

1. 形核：在铁素体和渗碳体的相界面处形核：通过同素异构转变和渗碳体溶解
2. 长大：向铁素体和渗碳体两方面长大：通过同素异构转变和渗碳体溶解
3. 残留渗碳体溶解：由于同素异构转变快于溶解，因此需要残留渗碳体溶解
4. 奥氏体均匀化：完成转变时碳溶解的不均匀，需要长时间保温以完成均匀化

#### 2. 形成速度：

1. 加热温度越高、过热度越大：奥氏体晶核数越多，碳扩散越快，长大越快
2. 加热速度越快：转变过程越快
3. 原相界面越多：奥氏体形成速度越快

### 3.1.2 奥氏体晶粒大小

#### 1. 奥氏体的实际晶粒度

1. 奥氏体转变刚完成时，奥氏体晶粒较细小；若继续加热或在较高温度下保温，晶粒会自发合并成较大的晶粒，即奥氏体晶粒的长大
2. 加热温度越高，保温时间越长，奥氏体晶粒越大

3. 当晶粒大小超过规定尺寸时，即发生加热缺陷：“过热”
2. 奥氏体的本质晶粒度
  1. 本质晶粒度：表示不同的钢在加热时奥氏体晶粒长大倾向的大小（并不代表实际晶粒大小）
  2. 含有Nb、Ti、V等元素的钢是本质细晶粒度钢：形成金属间化合物等小粒子分布于奥氏体晶界上，以阻碍奥氏体的长大；但当温度很高时，阻碍作用消失，奥氏体突然长大
  3. 含有Si、Mn的钢是本质粗晶粒钢
3. 加热缺陷
  1. 过热：奥氏体晶粒大小超过规定尺寸
  2. 氧化： $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{FeO}$
  3. 脱碳： $\text{C} \rightarrow \text{CO}_2$

## 3.2 奥氏体转变图

将加热得到的奥氏体冷却到  $A_1$  ( $A_3$ 、 $A_{cm}$ ) 线以下，奥氏体不立即发生反应而处于不平衡状态，称为过冷奥氏体。过冷奥氏体在不同温度下经不同时间后开始转变，并得到不同的转变产物。

### 3.2.1 奥氏体等温转变图 (Temperature-Time-Transformation)

1. 奥氏体等温转变图测定原理
  1. 将多组奥氏体试样迅速冷却在不同温度的浴盐中保温，每过一段时间取出一块试样，立即淬入水中，观察组织
  2. 将所有的转变开始点和转变终止点连接，得到转变开始线和转变终止线，即C曲线
2. 奥氏体等温转变图分析：

孕育期：转变开始前的时间

  1. 孕育期和转变速度随等温温度变化：
    1.  $560^\circ\text{C} \sim A_1$ （高温区）：随温度降低，过冷度增加，转变驱动力增加，孕育期缩短，转变速度提高
    2.  $560^\circ\text{C}$ 时（鼻温）：孕育期最短，转变速度最快

3.  $M_s \sim 560^\circ\text{C}$ （低温区）：随温度降低，虽然驱动力增加，但原子活动能力显著减小，孕育期变长，转变速度变慢

2. 转变类型随等温温度变化：

1.  $560^\circ\text{C} \sim A_1$ （高温区）：珠光体转变

2.  $M_s \sim 560^\circ\text{C}$ （低温区）：贝氏体转变

3.  $M_f \sim M_S$ ：马氏体转变：与冷却速度无关（瞬间平衡，继续降温继续转变）

3. 过冷奥氏体等温转变过程及产物

1. 珠光体转变：

1. 过程：

1. 形核：在奥氏体晶界处形成片状渗碳体核心，在渗碳体两侧形成铁素体晶核

2. 长大：反复进行，形成铁素体和渗碳体片层相间的珠光体领域

2. 产物：等温温度越低，转变速度越快，珠光体片层越细，强度硬度越高，塑韧性增加

1. 珠光体 P：片层较粗

2. 索氏体 S：片层较细

3. 托氏体 T：片层极细

2. 贝氏体转变：

1. 过程：形核 + 长大：

在奥氏体晶界处形成过饱和铁素体，之后从铁素体中析出渗碳体

2. 产物：

1. 上贝氏体： $350 \sim 560^\circ\text{C}$ ：羽毛状，硬度较高，铁素体片较粗，塑韧性较差

2. 下贝氏体： $M_s \sim 350^\circ\text{C}$ ：针叶状，高硬度，塑韧性较好

3. 等温淬火：盐浴处理中高碳合金钢得到下贝氏体

3. 马氏体转变：

1. 孕育期极短，必须继续降温才发生新的转变

2. 由于转变速度极快，只发生铁素体晶体结构改变，而碳原子来不及析出，形成过饱和固溶体，造成畸变而产生较大的内应力

3. 马氏体硬度强度高，但脆性大，且碳含量越高脆性越大

4. 由于同素异构转变发生晶格膨胀，有残留奥氏体  $\gamma'(A')$  被挤压而无法转变

#### 4. 影响奥氏体等温转变的主要因素

##### 1. 碳含量：

1. 亚共析钢在转变前先析出铁素体（多一条线），过共析钢在转变前先析出渗碳体（多一条线）
2. 共析钢的转变图最靠右，亚共析钢的转变图随碳含量增加右移，过共析钢的转变图随碳含量增加左移
3. 随碳含量增加， $M_s$  和  $M_f$  点降低

##### 2. 合金元素：

1. 除Co外，均使转变图右移
2. 除Al和Co外，均降低  $M_s$  和  $M_f$  点

### 3.2.2 奥氏体连续转变图 (Continuous-Cooling-Transformation)

#### 1. CCT图：

1. 绘制：无数个不同温度下等温时间很短的等温冷却
2. 特点：位于TTT图的右下方（实际上在高温区，但书上表述为右下方），也有珠光体转变开始和终了线，但无贝氏体转变线，多了一条珠光体转变中止线（K线），冷却速度碰到K线时，过冷奥氏体就不再向珠光体转变；
3. 直到保持到  $M_s$  以下才转变为马氏体
4. 过共析钢也无贝氏体转变，亚共析钢在一定温度范围内会完全转变为贝氏体

#### 2. 用TTT图估计CCT图：

1. CCT图绘制困难，用TTT图估计：将连续冷却速度线绘制在TTT图上，观察连续冷却速度线与C曲线的相交位置，从而估计转变所获得的组织
2.  $v_{\text{临}}$ ：恰好与奥氏体等温转变图的转变开始线相切；要得到马氏体，冷却速度应大于  $v_{\text{临}}$

## 3.3 钢的普通热处理

钢的普通热处理：将工件整体进行加热、保温和冷却，使其获得均匀的组织 and 性能的操作

### 3.3.1 钢的退火

退火：将工件加热到临界点（ $A_1$ 、 $A_3$ 、 $A_{cm}$ ）以上或临界点以下某一温度，保温一段时间后，以十分缓慢的冷却速度（炉冷、坑冷、灰冷）进行冷却的一种工艺操作

#### 1. 完全退火

1. 适用：亚共析钢，合金钢的铸件、锻件、焊接结构件
2. 工艺：将工件加热到  $A_{c3}$  以上30~50°C，保温一段时间后十分缓慢的冷却到500°C以下，然后空冷
3. 组织：铁素体 + 珠光体
4. 目的：改善组织，细化晶粒，降低硬度，改善切削性能。一般作为强度不高的零件的最终热处理；重要零件的预备热处理

#### 2. 球化退火：

1. 使用：共析钢、过共析钢
2. 工艺：将工件加热到  $A_{c1}$  以上30~50°C，保温一段时间后随炉冷却到600°C以下出炉空冷
3. 组织：球状珠光体
4. 目的：降低硬度，改善切削性能，为淬火做准备，减小淬火变形和开裂

#### 3. 去应力退火：

1. 工艺：缓慢加热到500~650°C，保温一段时间，随炉缓慢冷却到200°C以下出炉空冷
2. 目的：消除残留应力，组织和性能无明显变化

### 3.3.2 钢的正火

1. 工艺：将工件加热至  $A_{c3}$  或  $A_{cm}$  以上30~80°C，保温后直接空冷
2. 与正火对比：冷却速度快，正火后组织更细（索氏体），强度和硬度提高
3. 退火和正火的选择：
  1. 切削加工性：
    1. 低碳钢硬度低，容易粘刀，通过正火提高硬度有利切削

2. 高碳钢硬度高，难以加工，通过退火降低硬度有利切削
  3. 中碳钢采用退火或正火作为预备热处理
  4. 正火的经济性好于退火：空冷省炉子
2. 使用性能：
1. 若性能要求不高：选正火为最终热处理，提高力学性能
  2. 若工件形状复杂：选退火为最终热处理，防止出现裂纹

### 3.3.3 钢的淬火

#### 3.3.3.1 淬火的目的是

1. 淬火：将工件加热到  $Ac_3$ 、 $Ac_1$  以上30~50°C，保温一段时间后迅速冷却以获得马氏体
2. 目的：获得马氏体（或下贝氏体）
3. 应用：淬火及随后的回火是许多零件的最终热处理

#### 3.3.3.2 淬火介质

1. 理想的淬火冷却速度：
  1. 产生马氏体：冷却速度大于  $v_{\text{临}}$ ，避免产生P、S、T
  2. 冷却速度过快，会产生较大的应力，导致变形和开裂
  3. 理想：在孕育期较短的地方快冷，在其他位置慢冷
2. 常用淬火介质
  1. 水：
    1. 优点：淬冷能力强，廉价
    2. 缺点：形成蒸汽膜，有未淬硬的软点，容易开裂
  2. 盐水：
    1. 优点：淬冷能力更强，形成盐晶体破坏蒸汽膜
    2. 缺点：使工件变形甚至开裂
  3. 机油：
    1. 优点：减少变形和开裂
    2. 缺点：不易使得钢得到马氏体，仅适用于合金钢

### 3.3.3.3 常用淬火方法

1. 单液淬火法
2. 双液淬火法：水淬油冷
3. 分级淬火法：盐浴 + 空冷
4. 等温淬火法：盐浴，获得下贝氏体

### 3.3.3.4 钢的淬透性

1. 淬透性：
  1. 淬硬层深度：工件表面至半马氏体之间的深度
  2.  $v_{\text{临}}$  较小的工件能获得更多的淬硬层
  3. 淬透性：钢在淬火时获得淬硬层的能力
2. 比较淬透性的方法：
  1. 临界直径法；
  2. 顶端淬火法；
3. 影响淬透性的因素：
  1. 淬透性取决于  $v_{\text{临}}$ ，凡是能影响等温转变图的因素都能影响淬透性
  2. 合金元素：除 Co 外，均能提高淬透性
  3. 碳含量：亚共析钢的淬透性随碳含量增加而增加，过共析钢的淬透性随碳含量增加而降低，因此共析钢的淬透性最好
4. 在选材中考虑钢的淬透性：
  1. 大截面，承受拉力和压力的重要零件：要求表面和心部性能一致，需要淬透性好
  2. 某些零件心部性能不重要时，承受扭转和弯曲：可用淬透性较低的钢
  3. 焊接工件，承受强冲击的冷镦凸模，齿轮等，需要表硬心韧：不宜选用淬透性太高的钢

### 3.3.4 钢的回火

回火：将淬火钢重新加热至  $A_1$  点以下的某一温度，保温一段时间后冷却到室温

目的：降低淬火钢的脆性，减小或消除内应力

1. 淬火钢回火时组织变化：

1. 80~200°C，马氏体分解阶段：在淬火马氏体上析出薄片状细小  $\epsilon$  碳化物，形成过饱和  $\alpha + \epsilon$  碳化物组织，称为回火马氏体  $M_{\text{回}}$
  2. 200~300°C，残留奥氏体分解为过饱和  $\alpha + \text{碳化物}$
  3. 250~400°C，马氏体分解完成，内应力大大降低
  4. 400°C以上，渗碳体颗粒聚集长大并成球状，铁素体发生回复、再结晶
2. 性能变化：随回火温度提高，硬度、强度降低，塑性韧性升高
3. 回火的种类
1. 低温回火
    1. 温度：150~250°C
    2. 组织： $M_{\text{回}}$
    3. 性能：具有高硬度高耐磨性，内应力和脆性降低
    4. 应用：高碳钢制作的模具和滚动轴承，以及经渗碳和表面淬火的零件
  2. 中温回火
    1. 温度：350~500°C
    2. 组织： $T_{\text{回}}$ ，回火托氏体与托氏体不同，且由于渗碳体为球状，性能更好
    3. 性能：一定的韧性，高度弹性强度和屈服强度
    4. 应用：各类弹簧
  3. 高温回火
    1. 温度：500~650°C
    2. 组织： $S_{\text{回}}$ ，回火索氏体与索氏体不同，且由于渗碳体为球状，性能更好
    3. 性能：适当的强度，足够的塑性和韧性
    4. 应用：各类连接件和传动结构件；淬火 + 高温回火 = 调质

## 3.4 钢的表面热处理

### 3.4.1 表面淬火

将工件表面快速加热到奥氏体区，在热量尚未到达心部时迅速冷却，使得表面获得一定淬硬层，而心部仍保持原有组织

#### 1. 火焰淬火

1. 工艺：略
  2. 缺点：要熟练工操作
2. 感应淬火
1. 工艺：利用交流电产生感应电流加热表面，立即喷水获得淬硬层；
  2. 优点：表层组织细，硬度高，自动化程度高
  3. 缺点：设备贵
  4. 注意：
    1. 感应淬火前必须预备热处理，一般为调质或正火
    2. 感应淬火后还需要低温回火，降低内应力和脆性
  5. 工艺路线：  
锻造→退火或正火→粗加工→调质或正火→精加工→感应淬火→精磨→低温回火→精磨→时效→精磨→成品
3. 激光淬火
1. 工艺：将高功率密度的激光照射到工件表面，依靠工件自身热传导迅速自冷获得淬硬层
  2. 优点：淬火质量好，表层超细化，硬度好，脆性小，污染小
  3. 缺点：设备昂贵

### 3.4.2 表面化学热处理

将工件置于某种化学介质中，通过加热、保温和冷却使介质中某些元素渗入工件表层以改变工件表层的化学成分和组织，从而使表面具有和心部不同性能的一种热处理

主要特点：不仅组织不同，而且成分不同

1. 钢的渗碳
  1. 渗碳：向低碳钢或低碳合金钢工件表层渗入碳原子的过程
  2. 目的：提高工件表层的碳含量，使得工件经过热处理后具有高硬度和耐磨性，而心部具有良好的韧性和强度
  3. 应用：齿轮、活塞
  4. 分类：固体渗碳，液体渗碳，气体渗碳
  5. 后处理：渗碳后需要淬火+低温回火
  6. 组织：
    1. 表层：高碳回火马氏体 + 粒状渗碳体 + 少量残留奥氏体

2. 心部：随淬透性而定：

1. 普通低碳钢：铁素体 + 珠光体
2. 低碳合金钢：回火低碳马氏体 + 铁素体

7. 工艺：

锻造→正火→机械加工→渗碳→淬火→低温回火→精加工→成品

2. 钢的渗氮

1. 渗氮：向表层渗入氮原子的过程（原子？）
2. 目的：提高工件表面硬度、耐磨性、疲劳强度、耐蚀性和热硬性
3. 分类：气体渗氮、液体渗氮、低温氮碳共渗、离子渗氮、镀钛渗氮
4. 气体渗氮：将工件放入充有氨气的渗氮炉中，在渗氮温度下加热，氨气分解的活性氮原子被铁素体吸收并向内部扩散
5. 处理：渗氮前调质，得到回火索氏体；渗氮后不需要淬火、回火
6. 工艺：  
锻造→退火或正火→粗加工→调质→半精加工→去应力退火→粗磨→渗氮→精磨→成品
7. 优点：温度低，变形小，渗层薄，硬度高，耐磨性好，疲劳强度高，有一定的耐蚀性和热硬性
8. 缺点：生产周期长，渗氮层脆性大，需要使用专门的合金钢

## | CH4 合金钢

### | 4.1 概述

合金钢弥补碳钢性能上的不足：淬透性低、回火抗力低、强度低、不具备特殊性能

#### | 4.1.1 合金元素在钢中的作用

合金元素可以与铁、碳形成固溶体、碳化物和金属间化合物，改变钢的组织 and 性能

1. 改善钢的热处理工艺性能：

1. 细化奥氏体晶粒：除Mn外，所有合金均能阻碍奥氏体晶粒的生长
2. 提高淬透性：除Co外，几乎所有合金均能使等温转变右移，降低临界冷却速度，提高淬透性；Mn, Cr, W, Mo还能改变等温转变的形

状；除Co和Al，合金元素使马氏体转变温度下降，增加了淬火后的残余奥氏体

3. 提高回火抗力，产生二次硬化：在回火过程中抵抗硬度下降的能力；若Cr、W、Mo、V含量足够，产生碳化物，使得回火过程中硬度升高，成为二次硬化
4. 防止第二类回火脆性：回火脆性是指淬火钢回火后韧性降低，在250°~400°出现称为“第一类回火脆性”，与冷却速度无关，无法避免，只能避免在此温度进行回火；在500°~650°出现称为“第二类回火脆性”，只在含有Cr、Mn、Cr-Ni、Cr-Mn的钢中出现，可以用提高冷却速度或添加W、Mo的方法减轻回火脆性。

## 2. 使钢得到强化

### 1. 固溶强化

1. Ni、Si、Al、Co、Cu、Mn、Cr、Mo、W引起固溶强化，但会增加脆性

### 2. 第二相强化

1. Mn、Cr、Mo、W形成合金渗碳体，提高硬度和强度

### 3. 细晶强化

1. 钉扎效应，Ti、Nb、Zr、Al细化奥氏体晶粒或马氏体针条，提高强度硬度塑性韧性

## 3. 使钢获得特殊性能

### 1. 单相组织（含量较高时）

1. 奥氏体：Ni、Mn、Cu、Al
2. 铁素体：Si、Cr、W、Mo、V、Ti、Al

### 2. 致密氧化膜/金属间化合物

1. Si、Cr、Al、Ni、W、Mo、V形成致密氧化膜，提高抗腐蚀和抗高温性能

## 4.1.2 合金钢的分类及牌号

$w_m < 5$ ：低合金钢；  $5 < w_M < 10$ ：中合金钢；  $10 < w_M$ ：高合金钢

### 1. 合金结构钢

数字 + 合金元素符号 + 数字  
 $w_C \times 10000$    $w_M \times 100$

当合金元素  $w_M \leq 1.5\%$  不写第二个数字；高碳铬轴承钢： $GCr + \text{数字}$ ，数字表示铬质量分数的千分数；易切削钢：在前面加Y；低合金高强度结构钢：Q + 数字(屈服强度) + 质量等级(A、B、C、D、E)

## 2. 合金工具钢

$$\frac{\text{数字}}{w_C \times 1000} + \text{合金元素符号} + \frac{\text{数字}}{w_M \times 100}$$

当  $w_C > 1\%$  不标第一个数字；对于高速钢，不标第一个数字

## 3. 特殊性能钢，p108

# 4.2 合金结构钢

## 4.2.1 低合金高强度结构钢

### 1. 成分及性能特点

1. 碳含量较低：0~0.20%；合金元素含量较少
2. 常加入Mn、Ti、V、Nb、Re，强化铁素体，细化晶粒以提高强度

### 2. 常用牌号及热处理

#### 1. 热处理

1. 低合金高强度合金钢在热轧空冷后使用
2. 若焊接后正火：铁素体 + 珠光体
3. 若调质：回火索氏体
4. 调整合金元素，进行亚温淬火：铁素体 + 马氏体/ 铁素体 + 马氏体 + 奥氏体

#### 2. 常用牌号：

1. Q345：12MnV、14MnNb、16Mn、16MnRE、18Nb
2. Q390：15MnV、15MnTi、16MnNi
3. Q420：15MnVN、14MnVTiRE
4. Q460：14CrMnMoVB

## 4.2.2 合金渗碳钢

经过渗碳处理的低碳合金结构钢

### 1. 成分及性能特点

### 1. 成分:

1. 含碳量较低: 0.10%~0.25%: 保证心部有足够韧性
2. Cr、Ni、Mn、B: 提高淬透性; 提高渗碳层的强度和韧性
3. V、Ti、W、Mo: 细化奥氏体晶粒

### 2. 性能特点:

1. 表硬心韧; 较好的接触疲劳强度; 较好的淬透性

## 2. 常用牌号和热处理

### 1. 常用牌号

#### 1. 低淬透性合金渗碳钢:

1. 20Mn2、20MnV、20Cr、20CrV
2. 制造较小的零件: 小齿轮、活塞

#### 2. 中淬透性合金渗碳钢:

1. 20CrMn、20CrMnTi、20CrMnB、20CrMnMo
2. 中高速、冲击和剧烈摩擦: 变速箱齿轮、离合器轴

#### 3. 高淬透性合金渗碳钢:

1. 18Cr2Ni4W A
2. 大截面、高负荷、高耐磨性: 飞机曲轴、齿轮

### 2. 热处理: 渗碳后淬火低温回火

1. 表层: 细针状回火高碳马氏体 + 粒状碳化物 + 残留奥氏体
2. 心部: 铁素体 (托氏体) + 低碳马氏体

## 4.2.3 合金调质钢

经过调质处理的中碳合金结构钢

### 1. 成分及性能特点

#### 1. 成分

1. 含碳量: 0.25%~0.50%: 足够的强度和塑韧性
2. Mn、Cr、Si、Ni、B: 提高淬透性, 增强铁素体
3. V: 细化晶粒
4. Mo、W: 防止第二类回火脆性

#### 2. 性能特点:

1. 良好的综合力学性能

### 2. 常用牌号及热处理

## 1. 常用牌号

### 1. 低淬透性合金调质钢

#### 1. 40Cr、40MnB

#### 2. 截面较小、载荷较小：螺栓、主轴

### 2. 中淬透性合金调质钢

#### 1. 35CrMo、38CrSi

#### 2. 截面较大、载荷较大：火车曲轴、连杆

### 3. 高淬透性合金调质钢

#### 1. 38CrMoAlA、40CrNiMo A

#### 2. 截面大、载荷大：精密机床主轴、航发曲轴、连杆

## 2. 热处理：

### 1. 淬火 + 高温回火：回火索氏体

### 2. 局部感应淬火/ 渗氮 + 低温回火

### 3. 缺口处喷丸减少应力集中

## 4.2.4 合金弹簧钢

## 1. 成分及性能特点

### 1. 成分

#### 1. 碳含量较高：0.45%~0.70%：具有较高的强度和弹性极限

#### 2. Si、Mn、Cr、V、Nb、Mo、W：提高淬透性和耐回火性

#### 3. Mo、W、V、Nb：降低脱碳敏感性

### 2. 性能：

#### 1. 淬透性好，耐回火性好，脱碳敏感性小，高弹性极限，高屈服强度，足够塑韧性

## 2. 常用牌号及热处理

### 1. 常用牌号

#### 1. 含Si、Mn的合金弹簧钢

##### 1. 60Si2Mn

##### 2. 截面 $\leq 25\text{mm}$ 的弹簧：汽车的板弹簧

#### 2. 含Cr、V的合金弹簧钢

##### 1. 50CrV A

##### 2. 截面 $\leq 30\text{mm}$ 的弹簧，高温重载：阀门弹簧，内燃机弹簧

## 2. 热处理

1. 淬火 + 中温回火：回火托氏体

2. 表面喷丸

## 3. 弹簧的工艺

1. 冷成形弹簧：

1. 截面<10mm的小弹簧

2. 冷拉钢丝（冷轧钢带）/ 淬火 + 中温回火 → 冷卷 / 冲压 → 去应力退火 → 成品

2. 热成形弹簧：

1. 截面>10mm的大型或复杂弹簧

2. 下料 → 加热压弯 → 淬火 + 中温回火 → 喷丸 → 成品

## 4.2.5 轴承钢

制造轴承滚珠、滚柱和套圈；制造精密量具、冷冲模、机床丝杠

### 1. 成分及性能特点：高碳低铬钢

1. 成分：

1. 高碳：0.95%~1.05%：高硬度和高强度

2. Cr：0.35%~1.95%：提高淬透性，提高接触疲劳强度和耐磨性

3. Si、Mn、Mo：提高淬透性、弹性极限、抗拉强度

4. V：提高耐磨性，细化晶粒

5. 非金属含量，P、S很低

2. 性能：

1. 高硬度、高强度、高弹性极限、高接触疲劳强度、适当的韧性、一定的耐蚀能力

### 2. 常用牌号及热处理

1. 常用牌号

1. 高碳铬轴承钢：

1. GCr4、GCr15、GCr15SiMn、GCr15SiMo、GCr18Mo

2. 中小型滚动轴承；大型滚动轴承

2. 高碳无铬轴承钢

1. GMnMoVRE、GSiMoMnV

2. 用途与GCr15相同

## 2. 热处理：

1. 球化退火、淬火、低温回火
2. 球状珠光体 → 细针状回火马氏体 + 细粒状碳化物 + 残余奥氏体
3. 精密轴承：淬火后需要冷处理；回火和磨削加工后需要时效处理

## 3. 工艺路线：

1. 轧制或锻造 → 球化退火 → 机加工 → 淬火（→ 冷处理）→ 低温回火（→ 时效处理）→ 磨削（→ 时效处理）→ 成品

## 4.3 合金工具钢

包括碳素工具钢和合金工具钢，主要讨论合金工具钢

### 4.3.1 工具的服役条件

#### 1. 刀具：

1. 用来进行切削加工的工具，主要指车刀、铰刀、钻头
2. 失效：磨损、过热、冲击振动导致的折断

#### 2. 模具：

1. 进行压力加工的工具，可分为冷作模具和热作模具
2. 失效：强烈摩擦力与挤压力、巨大冲击、周期性剧烈温度变化

#### 3. 量具：

1. 控制加工精度的测量工具
2. 磨损、碰撞、变形

#### 4. 综述：

1. 服役条件：承受很大的局部载荷、冲击振动与热作用
2. 性能要求：高硬度，高耐磨性，足够的韧性；热硬性，耐热疲劳性
3. 成分含量： $0.35\% < w_C < 2.30\%$ ； $1\% < w_M < 19\%$ ；

### 4.3.2 常用合金工具钢及其热处理

#### 4.3.2.1 高碳低合金工具钢

##### 1. 成分

1.  $0.85\% < w_C < 1.10\%$
2.  $w_M < 5\%$
3. Si、Mn、Cr：提高淬透性和耐回火性；固溶强化马氏体从而提高硬度
4. W、V：形成碳化物，提高硬度、耐磨性；细化晶粒从而改善韧性
2. 性能：淬透性、耐回火性、耐磨性、韧性均比碳素工具钢好
3. 牌号：9SiCr、9MnCr、Cr2、CrWMn
4. 热处理：
  1. 预先热处理：球化退火，得到细粒状均匀碳化物
  2. 最终热处理：淬火+低温回火，得到回火马氏体+细粒状碳化物+残留奥氏体；
  3. 还可增加冷处理/时效处理，减少残留奥氏体和消除应力
5. 应用：中低速切削刀具，中等负荷冷作模具，量具

#### 4.3.2.2 高碳高合金工具钢

分为高速钢和高铬钢

1. 成分：
  1.  $0.70\% < w_C < 2.30\%$
  2.  $10\% < w_M$
2. 性能：
  1. 优异的淬透性、耐回火性、热硬性、耐磨性
3. 高速钢：用于制造高速切削刀具的钢种
  1. 成分：按主要合金元素可分为钨系、钼系、钒系
    1.  $0.70\% < w_C < 1.50\%$ ：保证马氏体硬度；与合金元素形成足够的碳化物：保证高硬度、高耐磨性、热硬性
    2.  $3.8\% < w_{Cr} < 4.0\%$ ：提高淬透性、耐回火性；增加抗氧化性、抗脱碳、抗腐蚀
    3.  $6.0\% < w_W < 19.0\%$ ， $0\% < w_{Mo} < 6.0\%$ ：提高淬透性；主要提高热硬性和耐回火性：使得马氏体在回火温度下二次硬化
    4.  $1.0\% < w_V < 5.0\%$ ：形成VC，提高硬度和热硬性，细化晶粒以改善韧性

2. 锻造：合金元素使得高速钢中含有大量的共晶碳化物，不能用热处理方式消除：需要在热处理前进行锻造，三镦三拔（合金均匀化），使碳化物呈小颗粒均匀分布，提高强度、塑韧性
  3. 热处理：
    1. 预先热处理：球化退火，得到索氏体+细粒状碳化物
    2. 最终热处理：淬火+高温回火（调质），得到马氏体+细粒状碳化物+大量残留奥氏体
    3. 多次回火/ 冷处理+回火，以减少残留奥氏体
    4. 表面处理：蒸汽处理、碳氮共渗
  4. 牌号：W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2
  5. 应用：高速切削或形状复杂的刀具，冷作/ 热作模具
4. 高铬钢：用于制造承受重载荷、形状复杂、变形小、耐磨性高的模具
1. 成分：碳和铬的含量都很高
  2. 锻造：也存在很多共晶碳化物，需要反复锻造
  3. 热处理：
    1. 预先热处理：球化退火，降低硬度以利切削并为淬火做准备，得到索氏体+粒状碳化物
    2. 最终热处理：淬火+回火，回火马氏体+粒状碳化物+残留奥氏体，具有耐磨性
      1. 低温淬火+低温回火：一次硬化法：耐磨性+足够强度和韧性
      2. 高温淬火+高温回火：二次硬化法：热硬性和耐磨性，韧性较差
  4. 牌号：Cr12、Cr12MoV

### 4.3.2.3 中碳合金工具钢

制造热作模具

1. 成分：
  1.  $0.35\% < w_C < 0.60\%$
  2. Mn、Ni、Si、Cr、W、Mo、V：提高淬透性和耐回火性
  3. W、Mo：抑制高温回火脆性
  4. Cr、W、Mo、Si：提高耐热疲劳性能

2. 锻造：反复锻造以消除轧材组织的方向性

3. 热处理：淬火+高温回火

1. 3Cr2W8V（高合金）：二次硬化，回火马氏体+碳化物+少量残留奥氏体

2. 5CrNiMo、5CrMnMo（低合金）：回火托氏体+索氏体

## 4.4 特殊性能钢

特殊性能钢是指具有特殊物理、化学性能的钢种，有不锈钢、耐热钢、低温钢、耐磨钢

### 4.4.1 不锈钢

1. 性能要求：耐腐蚀性

2. 成分特点：

1.  $0.03\% < w_C < 0.95\%$ ：含碳量越低，形成的CrC越少，耐蚀性越好

2. 合金元素：Cr、Ni、Si、Al、Mo、Ti、Nb

1. 提高基体的电极电位

2. 形成单相组织： $17\% < w_{Cr}$ ：单相铁素体； $9\% < w_{Ni}$ ：单相奥氏体；

3. 形成致密氧化膜： $Cr_2O_3$ ， $SiO_2$ ， $Al_2O_3$

4. 形成稳定的金属间化合物和碳化物：Ni、Al、Mo、Ti、Nb与C形成化合物，从而减少Cr与C形成的化合物

3. 常用不锈钢及其热处理：

1. 马氏体型不锈钢

1. 成分： $0.1\% < w_C < 1.0\%$ ， $12\% < w_{Cr} < 18\%$

2. 性能：

1. 淬透性好，空冷可得马氏体

2. 合金元素单一，只在氧化介质中抗腐蚀性好

3. 耐蚀性随碳含量增多而减少，力学性能随之增加

3. 牌号：（重点，注意区分）

1. 结构钢：12Cr13（S41010）、20Cr13（S42020）

2. 工具钢：30Cr13（S42030）、40Cr13（S42040）、95Cr18（S44090）

#### 4. 热处理、组织及应用：

1. 结构钢：调质，回火索氏体，蒸汽轮机叶片
2. 工具钢：淬火+低温回火，回火马氏体，医疗器械/ 不锈钢  
刀具；耐蚀滚动轴承/ 刀具

#### 2. 铁素体型不锈钢

1. 成分： $w_C < 0.15\%$ ， $12\% < w_{Cr} < 30\%$

##### 2. 性能：

1. 单相铁素体组织，无法淬火
2. 耐蚀性、塑性、焊接性均由于马氏体不锈钢，但强度较低

##### 3. 牌号：

1. 06Cr13Al (S11348)、10Cr17 (S11710)

#### 4. 热处理、组织及应用：

1. 退货或正火
2. 力学性能不高但耐腐蚀性能要求高：磷酸槽

#### 3. 奥氏体型不锈钢

1. 成分： $w_C < 0.12\%$ ， $17\% < w_{Cr} < 25\%$ ， $8\% < w_{Ni} < 29\%$

##### 2. 性能：

1. Cr：致密的钝化膜，进一步提高耐蚀性
2. Ni：扩大奥氏体相区
3. 高耐蚀性，高塑性，低温韧性，良好的焊接能力

##### 3. 牌号：

1. 18-8型不锈钢： $Cr > 18\%$ ， $Ni > 8\%$
2. 06Cr19Ni10 (S30408)、06Cr17Ni12Mo2 (S31608)

#### 4. 热处理，组织

1. 退火：奥氏体 + 碳化物
2. 固溶处理 + 快速冷却：单一奥氏体，强度低
3. 冷加工：强化
4. 去应力退火：防止应力腐蚀

##### 5. 缺点：

1. 容易产生晶间腐蚀：沿晶界析出  $Cr_{23}C_6$  等，电极电位改变；金属表面十分光亮，但失去金属声，稍用力即碎裂
2. 防止：

1. 降低C含量

2. 加入强碳化物形成元素：Ti、Nb

3. 固溶处理或退火处理以抑制碳化物形成

6. 应用：

1. 用于制造有机酸、碱、盐的机械零件和构件

4. 奥氏体-铁素体型不锈钢：

1. 成分：在18-8不锈钢的基础上调整Cr、Ni的含量，并加入Mn、Mo、W、Cu、N，形成双相不锈钢

2. 性能：

1. 兼有奥氏体和铁素体不锈钢的性能

2. 较好的耐蚀性，较好的抗应力腐蚀能力，抗晶间腐蚀能力

3. 牌号：

1. 12Cr21Ni5Ti（S22160）、14Cr8Ni11Si4Al（S21860）、  
022Cr22NiSiMo3N（S22253）

4. 应用：

1. 制作硝酸工业与尿素、尼龙生产的设备及零件

5. 沉淀硬化型不锈钢

1. 成分：在18-8不锈钢的基础上降低Ni的含量，并加入Al、Cu、Mo、Nb，在热过程中析出金属间化合物，实现沉淀硬化（时效）

2. 性能：高强度，高硬度，耐腐蚀

3. 牌号：

1. 07Cr17Ni7Al（S51370）、07Cr15Ni7Mo2Al（S51570）

4. 应用：化工机械设备，航天的设备和零件

5. 热处理及组织：

1. 加热后空冷（固溶处理）：单相奥氏体

2. 再加热后空冷：奥氏体-马氏体双相组织

3. 时效硬化处理：析出金属间化合物，提升硬度

## 4.4.2 耐热钢

高温下具有高热稳定性和热强性的特殊钢；

主要用于加热炉、锅炉、汽轮机、内燃机、航发、换热器

1. 性能要求

1. 高的热稳定性：高温抗氧化能力，形成致密氧化膜

2. 高的热强性：高的蠕变抗力和持久强度

## 2. 成分特点

1. 合金元素：Cr、Ni、Mo、W、V、Ti、Nb、Al、Si

2. Cr、Ni、W、Mo：固溶强化；单相组织；提高再结晶温度

3. V、Ti、Al、Nb：形成弥散的碳化物和金属间化合物，提高高温强度

4. Cr、Si、Al：形成致密的氧化膜，Cr的作用最突出

## 3. 常用耐热钢及其热处理

1. 马氏体型耐热钢：淬透性好，空冷可得马氏体，有两种类型

### 1. 低碳高铬钢：

1. 成分：在Cr13型不锈钢的基础上加Mo、W、V、Ti、Nb

2. 性能：高温强度好，在500°C以下具有良好的蠕变抗力和优秀的消振性

3. 牌号：14Cr11MoV、15Cr12WMoV

4. 应用：汽轮机叶片，又称叶片钢

### 2. 中碳铬硅钢：

1. 性能：抗氧化性好，蠕变抗力高，较高的硬度和耐磨性

2. 牌号：42Cr9Si2、40Cr10Si2Mo

3. 热处理及组织：淬火 + 高温回火：具有马氏体形态的回火索氏体

4. 应用：低于750°C的发动机排气阀，又称气阀钢

### 2. 铁素体型耐热钢：

1. 成分：在铁素体型不锈钢的基础上加Si、Al，提高抗氧化性

2. 性能：抗氧化性强，但高温强度低，焊接性能差，脆性大

3. 牌号：06Cr13Al、10Cr7、022Cr12

4. 热处理及组织：正火：铁素体组织

5. 应用：受力不大的加热炉构件

### 3. 奥氏体型耐热钢：

1. 成分：在奥氏体型不锈钢的基础上加W、Mo、V、Ti、Nb、Al，加强奥氏体，形成稳定的碳化物和金属间化合物，提高高温强度

2. 性能：高的热强性，高的塑性和冲击韧性，良好的焊接性和冷成形性

3. 牌号：06Cr8Ni1Ti、16Cr20Ni4Si2、45Cr14Ni14W2Mo
  4. 热处理及组织：固溶/ 固溶 + 时效：单相奥氏体 + 弥散碳化物 + 金属间化合物
  5. 应用：600~850°C的高压锅炉过热器、汽轮机叶片、叶轮、发动机气阀
4. 沉淀硬化型耐热钢：
1. 成分，热处理，机理均与沉淀硬化型不锈钢相同
  2. 牌号：
    1. 05Cr17Ni4Cu4Ni：透平叶片和轴
    2. 07Cr17Ni7Al：高温下的弹簧、膜片、波纹管

### 4.4.3 低温钢

工作温度在0°C以下的零件和结构件的钢种

冷冻设备、制氧设备、航天燃料的贮运装备、寒冷地区机械设备

1. 性能要求：
  1. 低温韧度好，韧脆转变温度低
  2. 影响低温冲击韧度的因素：
    1. 钢的成分：C、P、Si使得韧脆转变温度升高；Ni、Mn降低韧脆转变温度
    2. 晶体结构：体心立方的金属韧性随温度显著降低；面心立方降低较小
    3. 组织上：细化晶粒可以降低韧脆转变温度，加入V、Ti、Nb、Al可以细化晶粒
2. 常用低温钢及其热处理
  1. 低碳锰钢：正火：-45°C；调质：-60°C；加入合金细化晶粒：-70°C
  2. 低碳镍钢：二次正火/ 淬火 + 回火：-196°C
  3. 奥氏体型不锈钢：-269°C

### 4.4.4 耐磨钢

广义的耐磨钢指用于制造高耐磨性零件的钢种：高碳铸钢、硅锰结构钢、高碳工具钢、轴承钢

## 通常指高猛耐磨钢

### 1. 高猛耐磨钢的性能:

1. 单一的奥氏体组织: 韧性很好, 硬度不高, 受冲击和高压力时表层迅速硬化<sup>1</sup>
2. 表面磨损后, 继续硬化, 获得高硬度
3. 加工硬化能力高, 切削困难, 铸造成型: 因此牌号为ZG (铸钢)

### 2. 成分:

1. 高的碳:  $0.9\% < w_C < 1.5\%$  ( $1.15\% < w_C < 1.25\%$ ): 增加耐磨性和强度, 但碳含量太高会导致高温下碳化物析出
2. 高的锰:  $11\% < w_{Mn} < 14\%$ : 扩大并稳定奥氏体区; 耐磨性高, 冲击韧性低: Mn少; 耐磨性低, 冲击韧性高: Mn多
3. 适当的硅:  $0.3\% < w_{Si} < 0.8\%$ : 提高固溶体的硬度和强度, 但硅太多会导致碳化物的析出, 降低冲击韧度
4. 低的硫、磷

### 3. 热处理:

1. 浇筑后有碳化物在奥氏体晶界析出
2. 水韧处理 (固溶处理): 在 $1060\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 保温, 使得碳化物溶解, 后迅速冷却, 使得碳化物来不及析出, 以获得单相奥氏体组织, 水韧后不再回火, 以防止碳化物析出

### 4. 牌号: ZGMn13

5. 应用: 要求耐磨性并在冲击与压力的作用下: 坦克履带、破碎机牙板、铁路道岔
6. 说明: 若不在剧烈冲击和挤压条件下, 不能发挥高耐磨性

## | CH6 有色金属及其合金

将铁及其合金称为黑色金属, 将其他非铁金属及其合金称为有色金属

### | 6.1 铝及铝合金

#### | 6.1.1 工业纯铝

1. 性能: 密度小 ( $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ ); 良好的导电性和导热性; 磁化率低; 耐大气腐蚀性能好; 面心立方结构, 无同素异构转变; 有极好的塑性; 有良好的

低温韧性；强度过低

2. 含量：工业纯铝中  $99\% < w_{Al}$ ，含有Fe、Si、Cu等杂质；杂质越多，电导率、耐腐蚀性和塑性下降越多
3. 牌号：

$$\overset{1}{\underset{A、B或数字}{\times}} \times \times \times$$

铝质量分数小数点后两位

第二位为A：原始纯铝；B或其他字母：改型情况；数字：杂质含量的控制情况

4. 应用：配置铝合金，导线、电容，耐大气腐蚀的器具和包覆材料

## 6.1.2 铝合金

加入合金元素，通过固溶强化和第二相强化提高铝的强度

强度比一般高强度钢高得多，制作受较大载荷的机械零件和构件，是飞机的主要结构材料

### 1. 铝合金分类

1. 按成分分为变形铝合金和铸造铝合金：在  $D'$  点以左的合金，加热至固溶线以上温度时，可得单相  $\alpha$  固溶体，塑性好，能压力加工，称为变形铝合金；在  $D'$  点以右的合金，发生共晶反应，塑性较差，适用于铸造，称为铸造铝合金
  2.  $F$  点以左的合金  $\alpha$  固溶体成分不随温度变化，无法进行热处理强化，称为不能热处理强化的铝合金； $F$  点以右的合金  $\alpha$  固溶体成分随温度变化，能进行热处理强化，称为能热处理强化的铝合金；铸造铝合金也能进行热处理强化，但其中的  $\alpha$  固溶体成分较少，其强化效果不明显
- ### 2. 主要强化途径：冷变形（加工硬化）、变质处理（细晶强化）、热处理（时效强化）
1. 时效强化：
    1. 基本规律：铝的热处理为固溶+时效强化，固溶即淬火，使Cu来不及从Al中析出而形成过饱和的  $\alpha$  固溶体组织，产生固溶强化；在室温下保温一段时间，随时间延长，其强度硬度显著提高，称为时效强化
    2. 孕育期：在自然时效的初期，铝合金性能不发生改变，称为孕育期

### 3. 影响强化的因素：

1. 加热温度：提高时效温度，可使得孕育期缩短，时效速度加快，时效效果降低
2. 在室温以下，温度越低，时效效果越差，低温可以抑制时效的进行
4. 过时效：保温时间过长或时效温度过高：导致铝合金软化
5. 实质：淬火后的铝合金成分不稳定，在固溶体区形成区域极小的溶质原子偏聚区，造成晶格严重畸变，大大提高强度

### 2. 变质处理（细晶强化）：

在浇筑前向合金熔液中加入变质剂，增加结晶核心，细化晶粒提高强度

### 3. 变形铝合金

1. 变形铝合金：以压力加工，制成各种型材、棒料、板、管等半成品
2. 牌号：

$\begin{matrix} \times & & \times & & \times \times \\ \text{数字}2-9, & \text{表示组别} & A、B & \text{或数字, 改型情况} & \text{数字, 合金的编号} \end{matrix}$

### 3. 分类：铝铜合金、铝锰合金、铝锌合金、铝镁合金、铝锂合金

### 4. 铸造铝合金

1. 铸造铝合金：力学性能不如变形铝合金，但铸造性能好，能生产形状复杂的零件；常用变质处理进行强化
2. 牌号：

$\begin{matrix} ZL & 1 & 01 \\ & \text{合金系列} & \end{matrix}$

### 3. Al-Si 系铸造合金：铸造性能与力学性能配合最佳的铸造合金

1. 优点：铸造性能好，密度小，耐蚀性、耐热性、焊接性能好，强度低
2. 处理：变质处理；可加入Cu、Mn、Si等称为可时效强化的铝硅合金，强度较高
3. 应用：普通：形状复杂但强度要求不高的零件：仪表壳体等；特殊铝硅合金：中低强度的复杂铸件
4. 其他铸造铝合金：Al-Cu，Al-Mg，Al-Zn

## 6.3 铜及铜合金

## 6.3.1 工业纯铜

1. 性能：重金属，无磁性，面心立方结构，无同素异构转变，优良的导电性、导热性，很高的化学稳定性，具有良好的耐蚀性，但强度不高，塑性很好
2. 代号：T1，T2，T3：数字越大，纯度越低
3. 应用：不能作受力的结构材料，作为导电材料和耐腐蚀期间

## 6.3.2 铜合金

按加工方式可分为压力加工铜合金和铸造铜合金

### 1. 加工铜合金

#### 1. 加工黄铜：以锌为主要加入元素

1. 代号：H+数字
2. 组织：按退火态组织分为单相黄铜 ( $\alpha$ ) 和双相黄铜 ( $\alpha + \beta'$ )
  1. 单相黄铜：H80、H70：塑性好，强度低，适合冷塑性加工
  2. 双相黄铜：H62：强度较高，适合热加工
3. 应用：H68、H70：弹壳黄铜（三七黄铜）；H59、H62（商业黄铜）：制造水管、散热器等

#### 2. 加工白铜：以Ni为主要加入元素

1. 代号：B+数字 ( $B = w_{Ni}$ )
2. 组织：单相固溶体
3. 性能：冷热加工性能均好，耐蚀性高
4. 应用：精密机械仪表的零件、冷凝器，热交换器

#### 3. 加工青铜：除了黄铜和白铜的铜合金

##### 1. 锡青铜：Cu-Sn合金

1. 性能：具有优良的减磨性、抗磁性、低温韧性和耐磨性等。在海水、蒸汽和淡水中的抗蚀性优于纯铜和黄铜。
2. 应用：用于制造弹性元件、轴承等耐磨零件、抗磁和耐蚀零件。

##### 2. 铝青铜：Cu-Al合金

1. 性能：强度、硬度和耐磨性高于黄铜和锡青铜，铸造和焊接性能较差。

2. 应用：低铝青铜（Al%:7-9%）：主要用于制造耐蚀的弹簧和弹性元件。高铝青铜（Al%:10-11%）：主要制造船舶和飞机上的高强度、高耐磨的齿轮、轴承和轴套等零件。

3. 铍青铜：Cu-Be合金

1. 性能：高强度、高硬度、耐磨性好、抗腐蚀、导电、导热性好。低温韧性、抗磁性好，受冲击不起火花

2. 应用：主要用于制造弹性元件、耐磨零件和防暴工具

## 6.4 钛及钛合金

### 6.4.1 工业纯钛

1. 性能：密度小，高熔点，良好的塑性韧性，强度低，但比强度高，良好的抗腐蚀性和抗氧化性

2. 晶体结构：882.5℃以下( $\alpha$ )：密排六方结构；882.5℃以上( $\beta$ )：体心立方结构

3. 牌号：

1. TA1（0.20%O，0.03%N，0.10%C，0.25%Fe）

2. TA2（0.25%O，0.05%N，0.10%C，0.30%Fe）

3. TA3（0.30%O，0.05%N，0.10%C，0.40%Fe）

4. 应用：制作350℃以下工作、强度要求不高的零件及冲压件：石油化工用热交换器，海水净化装置，舰船零部件。

### 6.4.2 钛合金

1.  $\alpha$  型钛合金（TA）

1. 组织：室温下为单相  $\alpha$  固溶体

2. 牌号：TA4、TA5、TA6、TA7

3. 特点：固溶强化，但不能时效强化；具有较高的高温强度

4. 应用：制作 500℃ 以下的零构件，如航空发动机压气机叶片和管道，导弹的燃料罐，超音速飞机的涡轮机匣及火箭、飞船的高压低温容器

2.  $\beta$  型钛合金（TB）

1. 组织：淬火后为介稳定的单相  $\beta$  固溶体

2. 牌号：TB2
  3. 特点：淬火后塑性优异，冷成形性好，可时效强化，固溶+时效后强度提高
  4. 应用：制作 350°C 以下的零件和紧固件，如压气机叶片、轴、轮盘，飞机、宇航器结构件。
3. ( $\alpha + \beta$ )型钛合金（TC）
    1. 组织： $\alpha + \beta$
    2. 牌号：TC4
    3. 特点：兼具 $\alpha$ 、 $\beta$ 的优点，可时效强化
    4. 应用：制作 400°C 以下和低温下工作的零件：火箭发动机外壳，火箭和导弹的液氢燃料箱部件

## | 6.5 轴承合金

制造滑动轴承的轴瓦和内衬的耐磨合金

### | 6.5.1 轴承合金的性能要求、组织与牌号

1. 轴承合金的性能要求
  1. 足够的抗压强度、疲劳强度和冲击性能
  2. 摩擦系数小，减摩性能好，良好的磨合性能和抗咬合能力，蓄油性能好，以减小轴颈磨损并防止咬合
  3. 具有小的膨胀系数和良好的导热性能及耐腐蚀性能
2. 组织：必须配置成软硬不同的多相合金
  1. 软基体 + 硬质点
  2. 硬基体 + 软质点
3. 牌号：Z + 基体元素及含量 + 主加元素及含量 + 其他元素及含量
  1. ZPbSb15Sn5Cu3Cd2

### | 6.5.2 常用轴承合金

轴承合金有锡基、铅基合金（巴氏合金）、铜基、铝基、铁基等

1. 锡基轴承合金：以Sn为主再加入少量的Sb和Cu组成的合金

1. 组织:
  1. 软基体: Sb溶于Sn的 $\alpha$ 固溶体
  2. 硬质点: 以SbSn化合物为基的 $\beta'$ 固溶体,  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ 化合物
2. 应用: 用于重型动力机械: 气轮机, 高速内燃机, 涡轮压缩机
2. 铅基轴承合金: 以Pb为主再加入少量的Sb、Sn、Cu组成的合金
  1. 组织:
    1. 软基体:  $\alpha + \beta$  共晶体  $\alpha$  相为Sb溶入Pb的固溶体,  $\beta$  相为以SnSb化合物为基的含Pb固溶体
    2. 硬质点: 初生  $\beta$  相,  $\text{Cu}_2\text{Sb}$ 化合物
  2. 应用: 轻载、低速机械: 汽车, 拖拉机