

# 工程材料

专业基础必修课

北京化工大学 贾明印

[jiamy@mail.buct.edu.cn](mailto:jiamy@mail.buct.edu.cn)

13522357136



## ● 上节课回顾

### 1. 碳钢

普通碳素结构钢 Q215、Q235

优质碳素结构钢 20、45、60

碳素工具钢 T8、T10、T12

### 2. 合金钢

低合金结构钢 Q345(16Mn)、Q420(15MnVN)

渗碳钢 20Cr、20MnVB、20CrMnTi、18Cr2Ni4WA

调质钢 40Cr、40CrB、40CrNiMo、38CrSi

弹簧钢 65Mn、50CrV、60Si2Mn

轴承钢 GCr9、GCr15、GCr15SiMn

低合金刀具钢 9SiCr、CrWMn

高速钢 W18Cr4V

冷模具钢 Cr12MoV

热模具钢 5CrMnMo、5CrNiMo、4Cr5MoSiV

要求熟练掌握碳钢和合金钢的牌号、成分、热处理、组织、用途

## ● 3.2 合金钢(alloys)

### 3.2.4 特殊性能钢

1、不锈钢

2、耐热钢

3、耐磨钢

## 3.2 合金钢(alloys)

### 3.2.4 特殊性能钢

#### 1、不锈钢

#### 金属材料 腐蚀 概念

不锈钢是指在大气和一般介质中具有很高的耐腐蚀性的钢种。

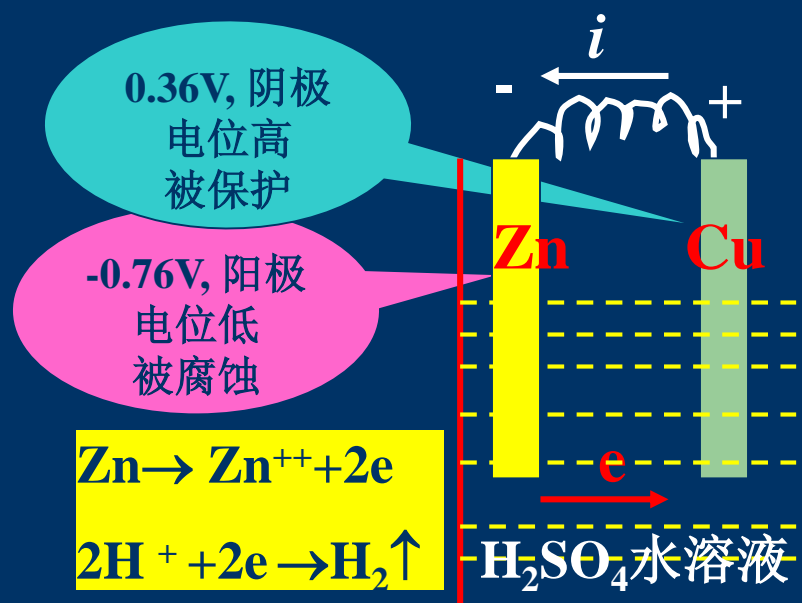
腐蚀是在外部介质的作用下金属逐渐破坏的过程。

化学腐蚀：金属同介质发生化学反应而破坏，不产生电流

电化学腐蚀：金属在电解质溶液中发生原电池作用而破坏，有电流

#### 防止措施：

- 使金属材料具有均匀的单相组织，并尽量提高其电极电位。
- 提高阳极材料的电极电位，以尽可能减小电位差。
- 在表面形成致密的、稳定保护膜，使金属“钝化”。



## 3.2 合金钢(alloys)

### 3.2.4 特殊性能钢

#### 1、不锈钢

#### 不锈钢成分特点

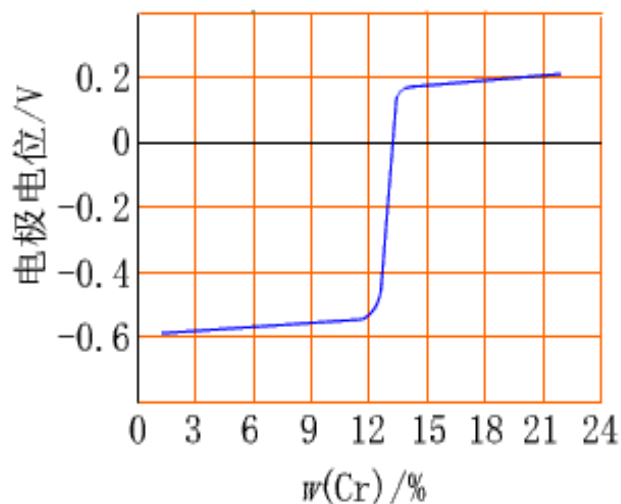
#### (1) 碳

耐蚀性要求愈高，碳含量应愈低。大多数不锈钢的碳质量分数为0.1%~0.2%。硬度高时，碳质量分数高（0.85%~0.95%），相应铬含量应提高。

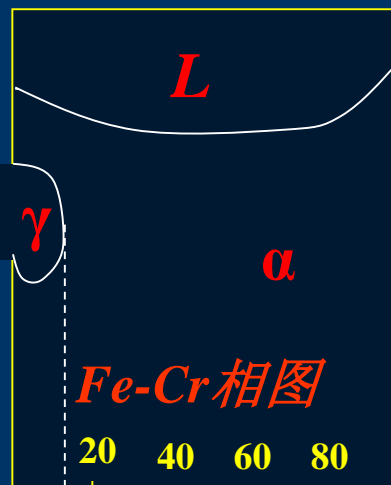
#### (2) 铬 最主要的合金元素

提高基体的电极电位。铬在氧化性介质（水蒸气、大气、海水、氧化性酸）中极易钝化，生成致密的氧化膜、使钢的耐蚀性大大提高。

高铬可得单相铁素体组织。



铬质量分数对Fe-Cr合金电极电位的影响(大气条件)



12.7

## ● 3.2 合金钢(alloys)

### 3.2.4 特殊性能钢

#### 1、不锈钢

#### 不锈钢成分特点

##### (3) 镍

获得单相奥氏体组织，显著提高耐蚀性；或形成奥氏体+铁素体组织，热处理后提高钢的强度。

##### (4) 钛、铌

优先同碳形成稳定碳化物，使Cr保留在基体中，避免晶界贫铬，减轻钢的晶界腐蚀倾向。 **(先占有碳)**

##### (5) 钼、铜

Cr在盐酸、稀硫酸和碱溶液中钝化能力差，Mo、Cu等元素可提高在非氧化性酸中的耐蚀性。

##### (6) 锰、氮

部分代镍以获得奥氏体组织，并能提高铬不锈钢在有机酸中的耐蚀性。

## ● 3.2 合金钢(alloys)

### 3.2.4 特殊性能钢

#### 1、不锈钢

**按正火状态的组织分为：**

**马氏体不锈钢（耐蚀性较好）**

**铁素体不锈钢（耐蚀性好）**

**奥氏体不锈钢（耐蚀性和强度均好）**

**双相（A+F）不锈钢**

## ● 3.2 合金钢(alloys)

### 3.2.4 特殊性能钢

#### 1、不锈钢

**(1) 马氏体不锈钢 (主要为铬含量在12%-18%范围内的低碳或高碳钢)**

铬的质量分数大于12%，在氧化性介质中（如大气、海水、氧化性酸等）耐蚀。在非氧化性介质中（浓盐酸、浓硫酸）不能达到良好的钝化，耐蚀性低。

**12Cr13 (1Cr13)、20Cr13 (2Cr13)** 耐蚀性较好，有较好的机械性能。**一般采用调质处理。**制作叶片、水压机阀、结构架、螺栓、螺帽等。

**30Cr13 (3Cr13)、40Cr13 (4Cr13)** 强度和耐磨性提高，但耐蚀性降低。**采用淬火、低温回火处理。**制作具有较高硬度和耐磨性的医疗工具、量具、滚珠轴承等。



不锈钢船用螺旋桨



不锈钢剪刀



## ● 3.2 合金钢(alloys)

### 3.2.4 特殊性能钢

#### 1、不锈钢

##### (2) 铁素体型不锈钢 (碳少,铬多)

10Cr17 (1Cr17)、10Cr17Ti (1Cr17Ti)、06Cr13Al

铬质量分数为17%~30%，碳质量分数低于0.15%，为单相铁素体组织。  
耐蚀性比Cr13型钢更好。

**退火或正火**状态下使用。

强度较低、塑性很好，可用形变强化提高强度。

**形变怎么提高强度？**

**加工硬化**

**应用：**用作耐蚀性要求很高而强度要求不高的构件，例如化工设备、容器和管道等。



## ● 3.2 合金钢(alloys)

### 3.2.4 特殊性能钢

#### 1、不锈钢

#### (3) 奥氏体型不锈钢(碳少,铬多,加入镍)

0Cr18Ni9、1Cr18Ni9、12Cr18Ni9Ti (1Cr18Ni9Ti)

碳含量很低,耐蚀性很好。

钢中常加入Ti或Nb,以防止晶间腐蚀。

强度、硬度低,无磁性,塑性、韧性和耐蚀性均较Cr13型不锈钢更好。

**只能用形变强化(加工硬化)提高强度(形变强化能力比铁素体型不锈钢要强)**

为什么奥氏体不锈钢不能通过热处理强化,只能用冷加工强化手段提高其强度?

淬火就是得到马氏体组织,提高硬度,但改变了相。另外,热处理奥氏体钢的时候,加热时会经过敏化区间,过饱和的C会向晶粒边界扩散,和Cr结合,造成晶间贫Cr,出现裂纹等缺陷,强度就低了。

判断:奥氏体型不锈钢只能采用加工硬化。 (√)

## ● 3.2 合金钢(alloys)

### 3.2.4 特殊性能钢

#### 1、不锈钢

采用固溶处理进一步提高耐蚀性，也是奥氏体不锈钢常用的热处理工艺。

#### (1) 固溶处理

将钢加热至 $1050\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 使碳化物充分溶解，然后水冷，获得单相奥氏体组织，提高耐蚀性。

固溶处理和淬火有何区别？

- 固溶处理是指将合金加热到高温单相区恒温保持，使过剩相充分溶解到固溶体中后快速冷却，以得到过饱和固溶体的热处理工艺。
- 淬火是把钢加热到临界温度以上，保温一定时间，然后以大于临界冷却速度进行冷却，从而获得以马氏体为主的不平衡组织的一种热处理工艺方法。

## ● 3.2 合金钢(alloys)

### 3.2.4 特殊性能钢

#### 1、不锈钢

采用固溶处理进一步提高耐蚀性，也是奥氏体不锈钢常用的热处理工艺。

#### (2) 稳定化处理(用于含钛或铌的不锈钢)

固溶处理后，加热到 $850\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 880\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，使钢中铬的碳化物完全溶解，钛、铌的碳化物不完全溶解。然后缓慢冷却，让碳化钛、碳化铌充分析出，将钢中的碳全部固定在碳化钛和碳化铌中。碳不再同铬形成碳化物，有效地消除晶界贫铬，避免晶间腐蚀产生。

判断：奥氏体不锈钢的热处理工艺是淬火后稳定化处理。（ ）

## ● 3.2 合金钢(alloys)

### 3.2.4 特殊性能钢

#### 1、不锈钢

### 奥氏体不锈钢常用的热处理工艺

#### (3) 消除应力退火

将钢加热到 $300\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 消除冷加工应力；  
加热到 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上，消除焊接残余应力。

**奥氏体型不锈钢应用：**制作化工设备零件、输送管道、抗磁仪表、医疗器械等。



1Cr18Ni9Ti不锈钢表带



不锈钢容器

## ● 3.2 合金钢(alloys)

### 3.2.4 特殊性能钢

#### 1、不锈钢

**(4) 奥氏体和铁素体双相不锈钢 (碳少, 铬多, 镍多)**

**0Cr26Ni5Mo2**

**在奥氏体型不锈钢的基础上，提高铬含量或加入其它铁素体形成元素。**

**其晶间腐蚀和应力腐蚀破坏倾向较小，强度、韧性和焊接性能较好。节约Ni，得到广泛应用。**

**制造化工、化肥设备及管道，海水冷却的热交换设备等。**

## ● 3.2 合金钢(alloys)

### 3.2.4 特殊性能钢

### 2、耐热钢

GB/T 20878-2007 不锈钢和耐热钢 牌号及化学成分

(Stainless and heat-resisting steels Designation and chemical composition)

GB/T 1221-2007 耐热钢棒 Heat-resistant steel bars

类别	牌号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	其他	热处理	$\sigma_b$	$\sigma_{0.2}$	HB	应用
铁素 体型	16Cr25N											510	275	201	燃烧室
	06Cr13Al											410	177	183	退火箱、淬火架
	022Cr12											365	196	183	喷嘴900℃
	10Cr17											450	205	183	喷嘴
马氏 体型	42Cr9Si2											885	590		进气阀、排气阀
	14Cr11MoV											685	490		透平压缩机叶片
	12Cr13											540	345	159	耐氧化部件
奥氏 体型	53Cr21Mn9Ni4N											885	560	302	高温排气阀
	22Cr21Ni12N											820	430	269	抗氧化排气阀
	16Cr23Ni13											560	205	201	重油燃烧器
	20Cr25Ni20											590	205	201	喷嘴、燃烧室
	06Cr19Ni10											520	205	187	通用耐氧化部件
	4Cr14Ni14W2Mo											705	315	248	重负荷排气阀
沉淀 硬化	05Cr17Ni4Cu4Nb											1310	1180	375	燃气透平发动机
	07Cr17Ni7Al											1140	960	363	高温弹簧

#### 一、性能要求:

1、高温抗氧化性: 形成的氧化物的稳定性、致密性、完整性及其与基体的结合能力至关重要。

2、热强性: 抵抗高温下的蠕变

#### 二、成分特点:

1、高温抗氧化性: 加Cr、Si、Al。

2、热强性: 加入V、Ti等, 弥散强化。

提高室温和高温强度;

3、中、低碳: 碳化物在高温下易聚集。

GB/T 5680-2010 奥氏体锰钢铸件  
(Austenitic manganese steel castings)

牌号	化学成分			热处理	性能		
	C	Mn	Si		$\sigma_b$	Ku2	$\delta$
ZGMn13	1.05-1.35	11-14		水韧处理	685MPa	200J	25%

### 3、耐磨钢

wear-resisting steel

车辆履带、挖掘机铲斗、铁轨分道叉

#### 1) 用途

很高的耐磨性和韧性。

钢(主要指高锰钢)加热到临界温度以上(加热至1100°C左右),使钢中全部碳化物溶解到奥氏体中去,然后,迅速淬入水中,碳化物来不及从奥氏体中析出,保持了**均匀的奥氏体状态**(硬度不高,但具有良好的塑性和韧性)。类似固溶处理;

#### 4) 典型钢种

ZGMn13等 (ZG)、热处理后使用

#### 5) 热处理

水韧处理: (1000~1100) °C+水冷

③硅: 增加 ~ 0.8 %



## ● 课堂小测试

1. 1Cr18Ni9Ti 奥氏体型不锈钢，进行固溶处理的目的是(a)。

- (a) 获得单一的奥氏体组织，提高硬度和耐磨性
- (b) 提高抗腐蚀性，防止晶间腐蚀
- (c) 降低硬度，便于切削加工

2. 拖拉机和坦克履带板受到严重的磨损及强烈冲击，应选择用(b)。

- (a) 20Cr 渗碳淬火后低温回火
- (b) ZGMn13-3 经水韧处理
- (c) W18Cr4V 淬火后低温回火

## ● 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.1 铸钢

#### 用途

用于制造形状复杂，需要一定强度、塑性和韧性的零件，如机车车辆、船舶、重型机械的齿轮、轴，以及轧辊、机座、缸体、外壳等。

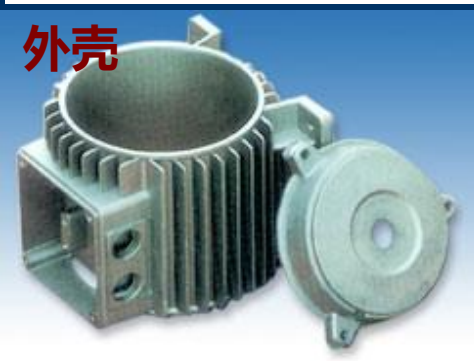
重型机械齿轮



轧辊



外壳



#### 化学成分

**Fe、C、Si、Mn、S、P**

- ◆ **碳**是影响铸钢件性能的主要元素。碳含量增加，屈服强度和抗拉强度增加。碳质量分数超过0.45%时，屈服强度很少增加，而塑性、韧性显著下降。
- ◆ **硅、锰**可以提高强度。
- ◆ **硫、磷**应控制，硫会增大钢的热裂倾向，磷使钢的脆性增加。

### ● 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

#### 3.3.1 铸钢

##### 铸钢牌号及强度

**铸钢：碳素铸钢和合金铸钢**

##### 1、碳素铸钢

**碳 碳素铸钢**在生产中使用最多的三种是

**ZG230-450(ZG25)**

**ZG270-500(ZG35)**

**ZG310-570(ZG45)**

**ZG表示铸钢**，数字分别表示屈服强度和抗拉强度。

**碳素铸钢**屈服强度为200MPa ~ 340MPa，  
抗拉强度为400MPa ~ 640MPa。

3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

必须热处理

3.3.1 铸钢

GB/T 5613-2014 铸钢牌号表示方法( Designation of cast steels)

GB/T 11352-2009 一般工程用铸造碳钢件( Carbon steel castings for general engineering purpose)

牌号		化学成分			热处理	性能			应用
		C	Mn	Si		$\sigma_b$	$\sigma_s$	$\delta$	
ZG200-400	ZG15	0.2			退火 或 正火	400	200	25	机座、变速箱壳体
ZG230-450	ZG25	0.3				450	230	20	机座、锤轮、箱体
ZG270-500	ZG35	0.4				500	270	16	飞轮、蒸汽锤
ZG310-570	ZG45	0.5				570	310	12	联轴器、齿轮
ZG340-640	ZG55	0.6				640	340	10	联轴器、齿轮

牌号	化学成分			热处理	性能			应用
	C	Mn	Si		$\sigma_b$	$\sigma_s$	$\delta$	
Q215A	0.15			不需要		215	31	桥梁、建筑
Q235A	0.18					235	26	轧制成型钢、钢板作构件用
Q275	0.33					275	22	

### ● 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

#### 3.3.1 铸钢

##### 铸钢牌号及强度

##### 2、低合金铸钢

##### 低合金铸钢牌号:

ZG40Mn

ZG40Cr

ZG35CrMo

##### 强度

屈服强度为330MPa ~ 460MPa,  
抗拉强度为600MPa ~ 680MPa

##### 高合金铸钢

**不锈钢**12Cr13 (1Cr13) 、  
20Cr13 (2Cr13) 、 12Cr18Ni9  
(1Cr18Ni9)

**高速钢**W18Cr4V

**模具钢**5CrMnMo、 5CrNiMo

也可以铸造成型

在钢号前加 “ZG” 2个字母, 如  
**ZG12Cr13**

## 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

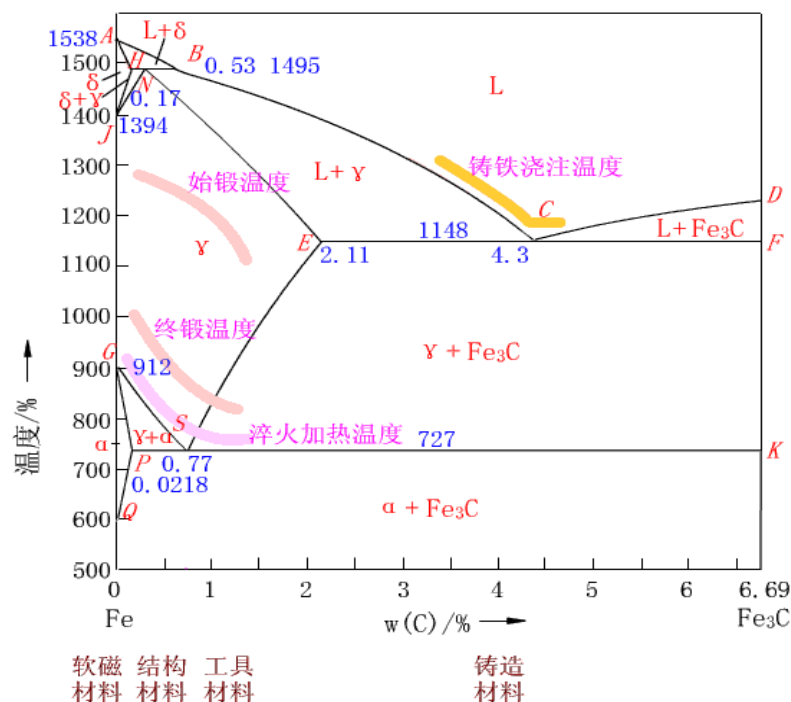
### 3.3.1 铸钢

#### 铸钢特点

碳素铸钢与铸铁相比，强度和塑性、韧性较高。

但铸钢钢水的流动性差，收缩率较大，成型性能不如铸铁。

铸钢在浇注时应采取较高的浇注温度，采用大的浇冒口。



## ● 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.1 铸钢

#### 铸钢的组织特征

铸钢浇注温度很高，冷却较慢，容易得到粗大的奥氏体晶粒。

室温组织：F+P

在冷却过程中，铁素体首先沿奥氏体晶界呈网状析出，然后沿一定方向以片状生长，形成“魏氏组织”。使钢的塑性和韧性下降，不能直接使用。

因此，需热处理。



粗晶魏氏组织铁素体 200×

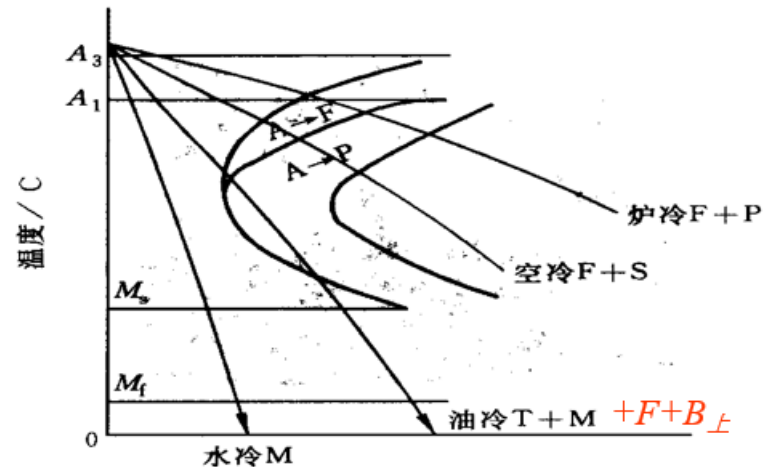


魏氏组织

## 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.1 铸钢

#### 铸钢的热处理



(1) 扩散退火 成分均匀化

(2) 完全退火(重结晶退火)

消除魏氏组织和铸造应力。

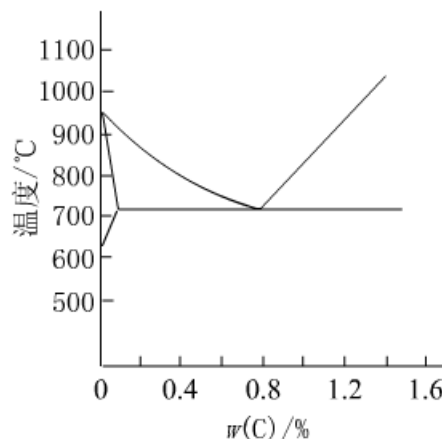
组织: 珠光体 + 铁素体

(3) 正火 细化晶粒, 消除魏氏组织和铸造应力, 改善机械性能。

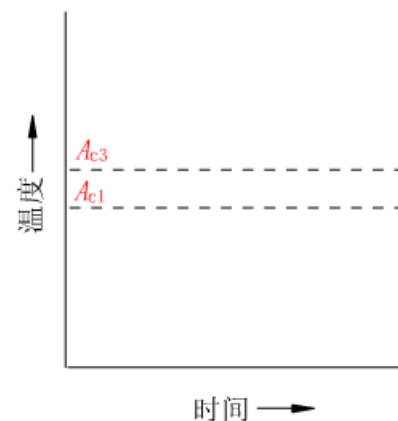
组织: 索氏体 + 铁素体

(4) 淬火 + 回火处理

小型铸件采用油淬



(1) 加热温度



(2) 工艺曲线

扩散退火

完全退火

球化退火

去应力退火



钢中的含碳量越高，原始组织中的渗碳体就越多，铁素体和渗碳体的相界面就越多，奥氏体形核率增大。碳含量越高，奥氏体中碳的扩散速度就越大，增加了奥氏体的长大速度。

## ● 课堂小测试

3、奥氏体的形成速度，随着（D）而加快。

- A. 碳含量降低，加热速度增大
- B. 碳含量提高，加热速度减小
- C. 碳含量降低，加热速度减小
- D. 碳含量提高，加热速度增大

影响A转变速度的因素

- 加热温度
- 加热速度
- 碳质量分数
- 合金元素
- 原始组织

4. 某铸钢件因成份不均匀，影响其性能，这时可进行（B）处理加以改善。

- A. 完全退火
- B. 扩散退火
- C. 球化退火
- D. 正火

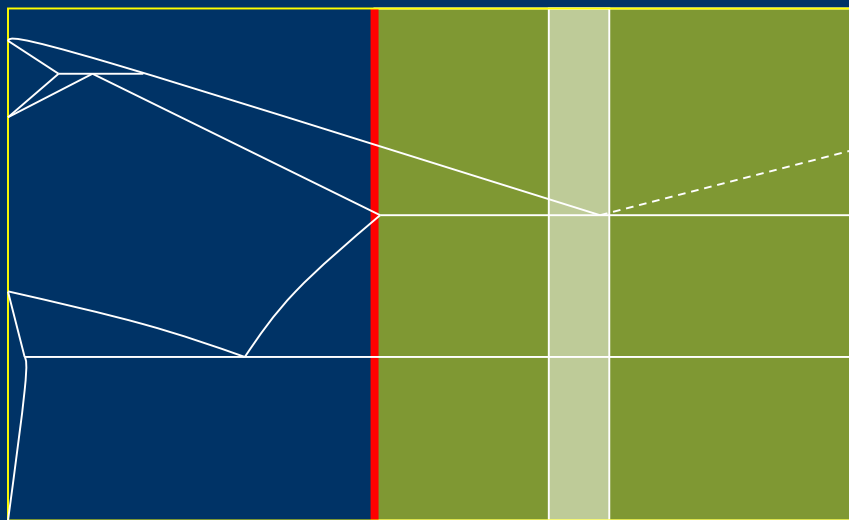
## ● 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

**铸铁是碳质量分数大于2.11%、含有较多的硅、锰、硫、磷等元素的铁碳合金。**

**铸铁生产设备和工艺简单，价格便宜，具有许多优良的使用性能和工艺性能，应用广泛。**

**Fe-Fe<sub>3</sub>C相图**



## ● 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

#### 1、铸铁的特点

##### ①碳在铁碳合金中的存在形式

在铁碳合金中，碳可以以三种形式存在：

- 固溶在F、A中
- 化合物态的渗碳体( $\text{Fe}_3\text{C}$ )
- 游离态石墨 (G)

#### 石墨化：

铸铁中碳原子析出形成石墨的过程。

(1)从液体、铁素体和奥氏体中析出。

(2)渗碳体分解获得。

## 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

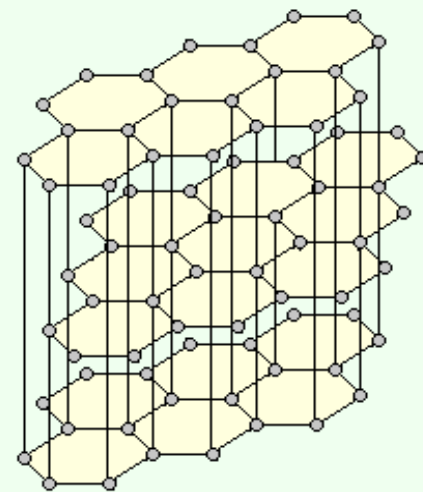
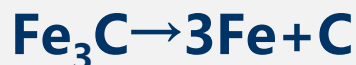
#### 1、铸铁的特点

#### ②石墨的晶体结构与性能

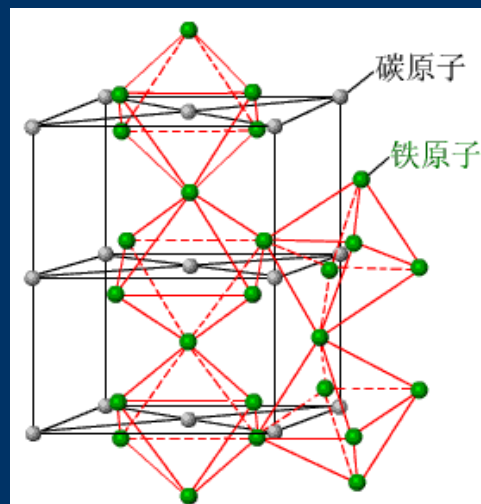
**石墨(G)** 稳定相，简单六方晶格。底面上原子呈六方网格排列，原子间距小 ( $1.42 \times 10^{-10} \text{ m}$ )，结合力很强；

底面间的间距较大 ( $3.04 \times 10^{-10} \text{ m}$ )，结合力较弱。石墨的强度、硬度和塑性很差。

**渗碳体** 亚稳相，具有复杂的晶体结构，硬而脆。在一定条件下能分解为铁和石墨：



石墨的晶体结构



$\text{Fe}_3\text{C}$

## ● 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

#### 石墨的作用

- (1) 石墨提高铸铁的切削加工性能。
- (2) 铸件凝固时石墨膨胀，减少铸件体积收缩，降低内应力。  
铸铁铸造性能良好。
- (3) 石墨有良好的润滑作用，并能储存润滑油，使铸件有很好的耐磨性能。
- (4) 石墨对振动的传递起削弱作用，使铸铁有很好的抗振性能。
- (5) 石墨强度、韧性极低，相当于裂纹或空洞。石墨越多，越大，对基体的割裂作用越严重，铸铁抗拉强度越低。

## 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

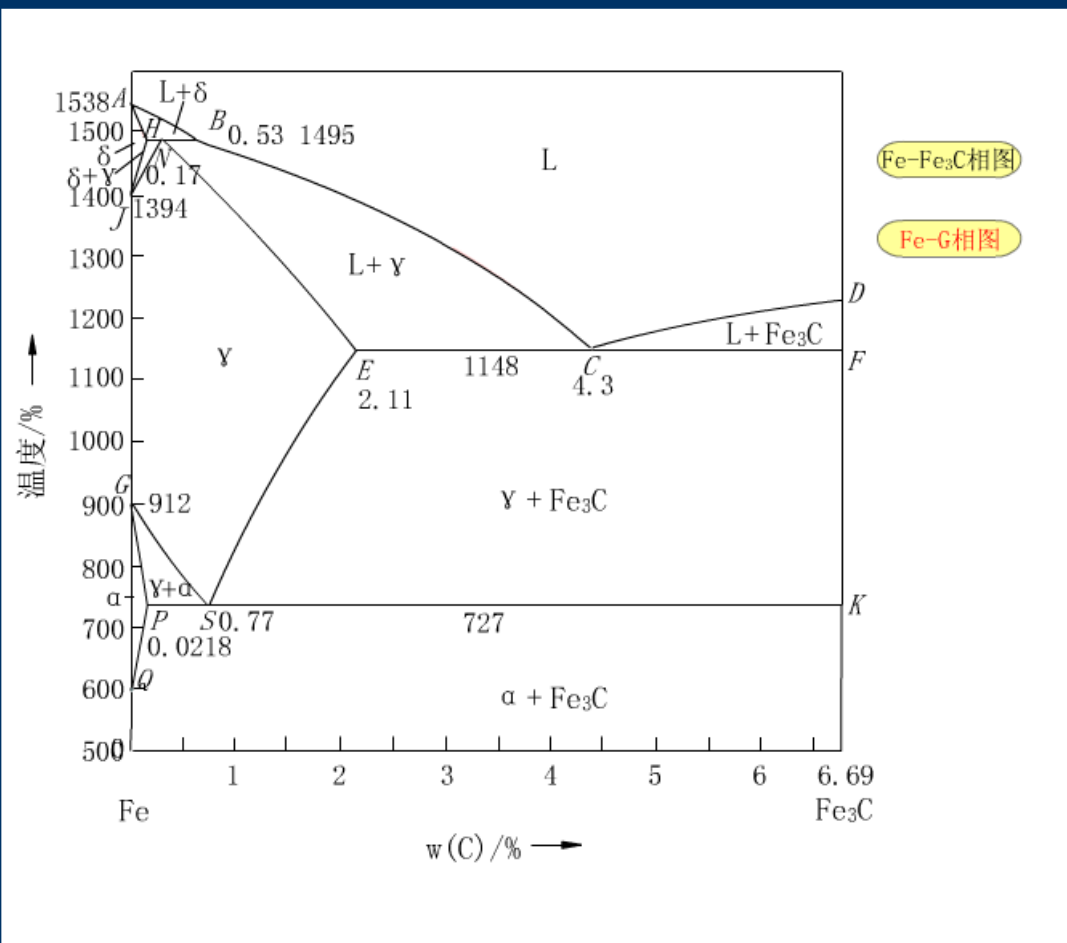
#### 1、铸铁的特点

#### ③复线铁碳合金相图

在不同条件下，铁碳合金可以有亚稳定平衡的Fe-Fe<sub>3</sub>C相图和稳定平衡的Fe-G相图。

含Si较多、冷却速度很慢时铁碳合金按稳定平衡Fe-G相图结晶。

冷却速度稍快时铁碳合金按亚稳定平衡Fe-Fe<sub>3</sub>C相图结晶。



## 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

#### 1、铸铁的特点

##### 1) 铸铁的石墨化过程

☆ 重点内容

#### ● 第一阶段石墨化

形成一次石墨和共晶石墨。



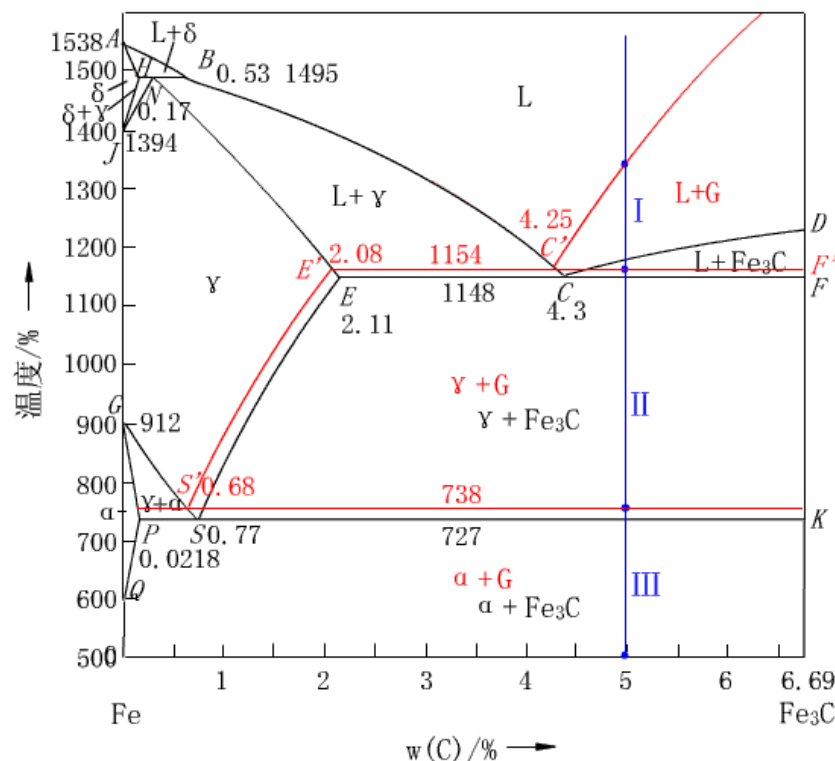
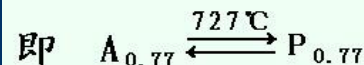
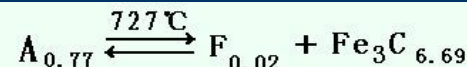
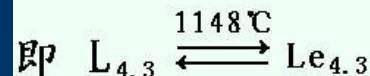
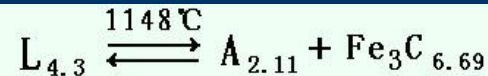
#### ● 第二阶段石墨化

奥氏体析出二次石墨。



#### ● 第三阶段石墨化

形成共析石墨和F中析出三次石墨。



## ● 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

#### 1、铸铁的特点

#### 1) 铸铁的石墨化过程

**影响石墨化的主要因素：**

##### (1) 温度和冷却速度

在生产过程中，铸铁在高温下长时间保温，或**缓慢冷却**，有利于石墨化。

##### (2) 合金元素

- C、Si、Al、Cu、Ni、Co等非碳化物形成元素促进石墨化，**碳和硅最强烈。**

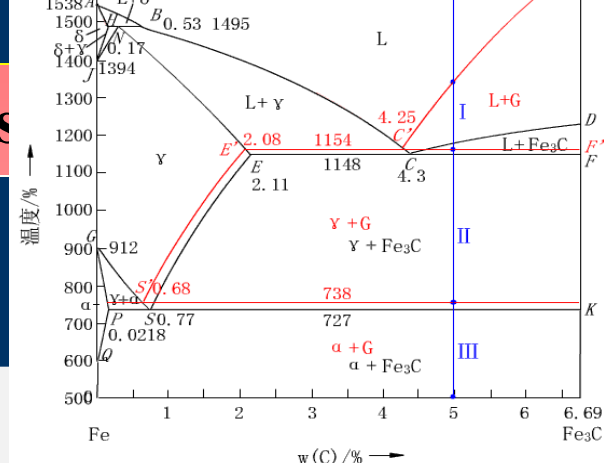
- Cr、W、Mo、V、Mn、S等碳化物形成元素阻碍石墨化。

**老师提示：**生产中，调整碳、硅含量，是控制铸铁组织和性能的基本措施。



## 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁



铸铁	第1阶段 石墨化	第2阶段 石墨化	第3阶段 石墨化	组织特征	组织	
白口铸铁	不进行	不进行	不进行	有Le' 无G	Le' + P + Fe <sub>3</sub> C II Le' Le' + Fe <sub>3</sub> C <sub>I</sub>	白口铸铁断面呈亮白色；它是在凝固过程中没有石墨析出，断口呈银白色的一类铸铁，简称白口铁；凝固过程中碳以渗碳体（即Fe <sub>3</sub> C）的形式存在于基体中。 <b>白口铸铁很难切削加工，主要作炼钢原料使用。</b> 但由于它的硬度和耐磨性高，也可以铸成表面为白口组织的铸件，如轧辊、球磨机的磨球等；
麻口铸铁	部分进行	部分进行	不进行	有Le' 有G	Le' + P + G	碳以石墨和渗碳体的混合形式存在，断口呈灰白色。这种 <b>铸铁有较大的脆性，</b> 工业上很少使用。
灰口铸铁 C% =2.5— 4.0	充分进行	充分进行	充分进行 部分进行 不进行	无Le', P 有G	F + G F + P + G P + G <b>什么是P?</b>	灰铸铁是在熔炼过程中严格控制过冷度形成的，但主要还是由于化学成分的区别，大量硅元素的存在，能促使碳石墨化，所以在灰铸铁中含硅量较高； <b>灰铸铁是最为常见的一种铸铁，灰铸铁又叫普通铸铁，</b> 断面呈暗灰色，碳以片状石墨形态存在于基体中。

## ● 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

#### 1、铸铁的特点

#### 2) 灰口铸铁的组织特征和分类



灰口铸铁组织由**基体**和**石墨**组成。

**基体**：铁素体、珠光体或铁素体+珠光体

**石墨**：片状、球状、蠕虫状、团絮状

#### 灰口铸铁的分类

灰口铸铁	石墨形态
灰铸铁、孕育铸铁(细化石墨)	片状、细片状
球墨铸铁	球状
蠕墨铸铁	蠕虫状
可锻铸铁	团絮状

灰口铁价格  
便宜，应用  
最广泛

## 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

#### 2、常用铸铁

##### 1) 灰铸铁

Grey cast iron

##### ① 牌号

HT100, HT400  $\sigma_b$



F+G<sub>片</sub>



F+P+G<sub>片</sub>



P+G<sub>片</sub>

“HT”表示“灰铁”，数字表示最低抗拉强度。灰铸铁有铁素体、珠光体和铁素体+珠光体三种基体。

灰铸铁中的碳、硅质量分数一般控制在以下范围：2.5%~4.0%C; 1.0%~2.0%Si。

灰铁的显微组织

哪种组织强度高？

## 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

#### 2、常用铸铁

##### 1) 灰铸铁

Grey cast iron

#### ②影响组织和性能的因素

成分: **C**、**Si**、**P**、**Mn**

碳当量:  $C_E = C + 1/3(Si + P)$

冷却速度: 影响基体

铸件的冷却速度对石墨化程度影响很大。

随着铸件壁厚增加, 冷却速度减慢, 依次出现珠光体灰口铁、珠光体加铁素体灰口铁和铁素体灰口铁。

●**锰**: 阻碍石墨化, 促进珠光体基体形成。提高铸铁强度。与硫生成MnS, 减少硫有害作用。锰质量分数一般为0.5%~1.4%。

●**磷**: 促进石墨化。提高铁水流动性。量大时形成磷共晶体, 硬而脆, 降低铸铁强度, 但提高耐磨性。要求铸铁有较高强度时, 磷质量分数< 0.12%, 耐磨铸铁要求磷质量分数

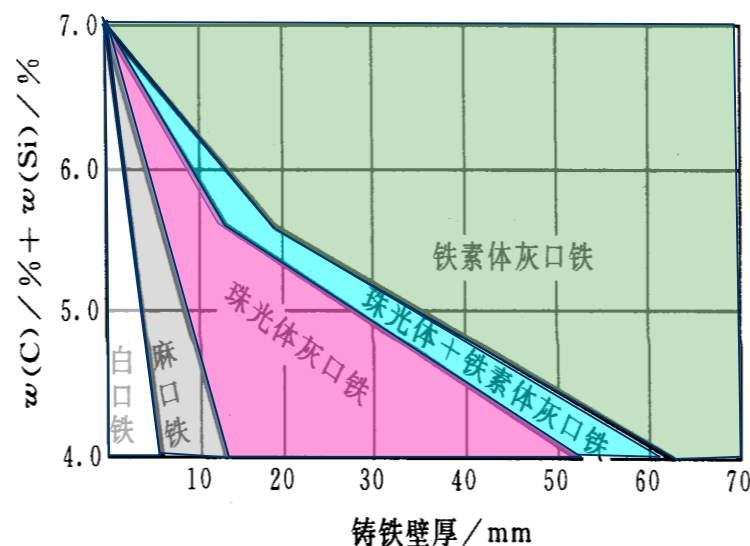


图 3-15 铸铁壁厚与碳、硅质量分数对铸铁组织的影响

### 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

#### 3.3.2 铸铁

#### 2、常用铸铁

##### 1) 灰铸铁

Grey cast iron

#### ③热处理

**老师提示：**热处理不改变石墨的形态和分布

**去应力退火 ( $< 550^{\circ}\text{C}$ )：** 防止变形或开裂

形状复杂和尺寸稳定性要求较高的铸件  
(机床床身、柴油机汽缸)，为防止变形和开裂，  
须进行 $500^{\circ}\text{C} \sim 550^{\circ}\text{C}$ 消除内应力退火。

**降硬度退火 ( $> 850^{\circ}\text{C}$ )：** 使渗碳体分解  
成石墨，降低硬度，便于切削加工

灰铸铁件表层和薄壁处产生白口组织难以切削加工，  
需要退火( $850^{\circ}\text{C} \sim 900^{\circ}\text{C}$ 保温 $2 \sim 5 \text{ h}$ )，使渗碳体  
分解成石墨，降低硬度。

**表面淬火：** 提高表面硬度及耐磨性

机床导轨、缸体内壁等，需要提高硬度和耐磨性，  
进行表面淬火。淬火后表面硬度可达 $50 \text{ HRC} \sim 55 \text{ HRC}$ 。

## 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

#### 2、常用铸铁

##### 1) 灰铸铁

Grey cast iron

##### ④应用

灰铸铁铸造性能优良、价格便宜，但强度较低、韧性差。制造机床床身、床头箱、阀体、叶轮、飞轮等。



箱体



启动阀



叶轮



发动机飞轮



## ● 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

#### 2、常用铸铁

##### 1) 灰铸铁

Grey cast iron

##### ⑤孕育处理

经过孕育处理后的灰铸铁叫孕育铸铁

**孕育处理目的：**铁水中生成大量均匀分布的非自发核心，获得细小均匀的石墨片，细化基体组织，提高铸铁强度；避免铸件边缘及薄断面处出现白口组织，提高断面组织均匀性。

孕育铸铁具有较高的强度和硬度

孕育剂：

硅类合金：硅铁合金、硅钙合金  
碳    类：石墨粉、电极粒

**应用：**制造机械性能要求较高的铸件，如**汽缸、曲轴、凸轮等**，尤其是截面尺寸变化较大的铸件。

## ● 课堂小测试

5. 铸铁的石墨化过程的第一、二阶段完全进行，第三阶段未进行，其显微组织为( **b** )。

(a) F+P+G

(b) P+G

(c) F+G

6. 提高灰口铸铁的耐磨性应采用( **c** )。

(a) 整体淬火

(b) 渗碳处理

(c) 表面淬火



## 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

#### 2、常用铸铁

##### 2) 球墨铸铁

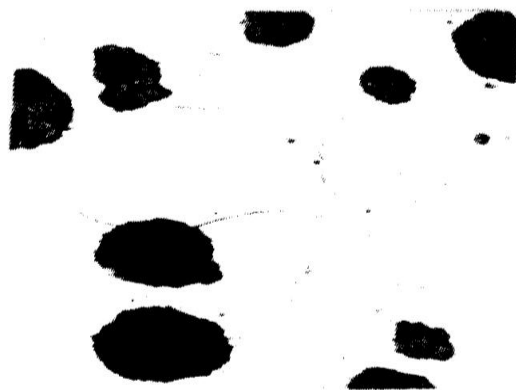
Spheroidal graphite ~

##### ① 牌号

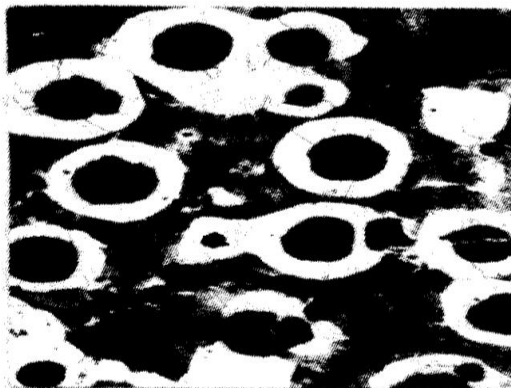
牌号	基体	性能			应用
		$\sigma_b$	$\sigma_{0.2}$	$\delta$	
QT400-15	F	400	250	15	阀门, 阀体
QT500-7	F+P	500	270	7	
QT800-2	P	800	560	2	曲轴, 主轴
QT900-2	M回	900	840	2	传动齿轮

QT400-15、QT600-3、QT800-2

球墨铸铁牌号用“QT”标明，其后两组数值表示最低抗拉强度和延伸率。



(a) 铁素体球墨铸铁



(b) 铁素体+珠光体球墨铸铁



(c) 珠光体球墨铸铁

## ● 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

#### 2、常用铸铁

##### 2) 球墨铸铁

Spheroidal graphite ~

##### ②成分

##### ③球化处理

**成分：**要求比较严格。3.6% ~ 3.9%C, 2.2% ~ 2.8%Si, 0.6% ~ 0.8%Mn, <0.07%S, <0.1%P。

严格控制C、Si、P、S等成分

过共晶成分：  $C_E = (4.5 \sim 4.7)\%$

**球化处理：**在铁水中加入一定量的球化剂和孕育剂，获得细小、均匀分布的球状石墨。

使用稀土镁球化剂。

镁强烈阻碍石墨化。为了避免白口，并使石墨球细小、均匀分布、一定要加入孕育剂。常用的孕育剂为硅铁和硅钙合金等。

## 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

#### 2、常用铸铁

#### 2) 球墨铸铁

Spheroidal graphite ~

#### ④热处理

如何提高表面耐磨性?  
表面淬火+低温回火

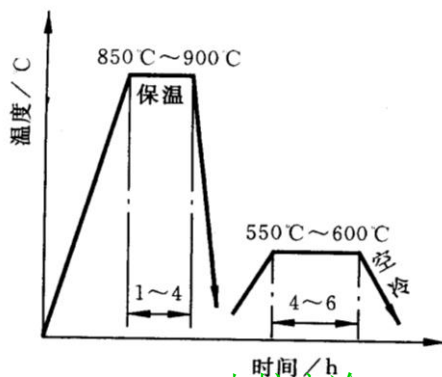


图 3-17 球墨铸铁调质处理工艺曲线

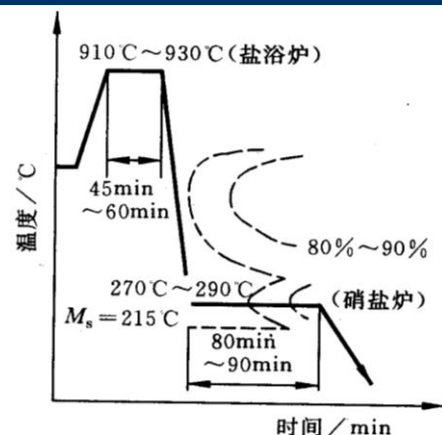


图 3-18 稀土镁、钼球墨铸铁拖拉机减速  
齿轮等温淬火工艺曲线

退火：获得F基体，消除白口

正火：提高基体中P含量,并细化组织

调质：加热到850 °C ~ 900 °C，使基体转变为奥氏体，在油中淬火得到马氏体，然后经550 °C ~ 600 °C回火，空冷。

**组织：回火索氏体+球状石墨**

等温淬火：B<sub>下</sub>基体+球状石墨

## ● 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

#### 2、常用铸铁

##### 2) 球墨铸铁

Spheroidal graphite ~

##### ⑤应用

**球墨铸铁的应用：**

**用球墨铸铁来代替钢制造某些重要零件。**

**如曲轴、连杆、凸轮轴等。**



曲轴



管道接口

**如果用合金钢，选什么类型的合金钢？**

## ● 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

#### 2、常用铸铁

#### 3) 蠕墨铸铁

Vermicular~

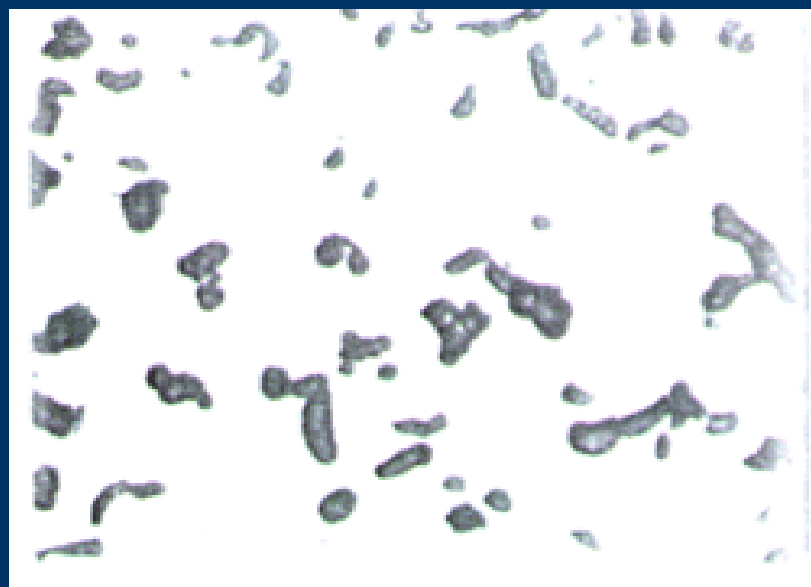
①牌号

RuT420, RuT260

蠕墨铸铁以“RuT”表示，数字表示最低抗拉强度

蠕墨铸铁的石墨在光学显微镜下为蠕虫状，长厚比小，端部较钝。

蠕墨铸铁是新型高强铸铁。强度接近于球墨铸铁，有一定的韧性、较高的耐磨性；又有和灰铸铁一样良好的铸造性能和导热性。



蠕墨铸铁组织

## ● 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

#### 2、常用铸铁

#### 3) 蠕墨铸铁

Vermicular~

#### ②蠕化剂

镁钛合金、稀土镁钛合金

#### 蠕墨铸铁的生产:

在一定成分的铁水中加入适量的蠕化剂形成。蠕化剂主要采用镁钛合金、稀土镁钛合金或稀土镁钙合金等。

**应用:** 用于高层建筑中高压热交换器、内燃机汽缸、缸盖、排气管、进气管、汽缸套、钢锭模、液压阀等铸件。



排气管



进气管

## 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

#### 2、常用铸铁

#### 4) 可锻铸铁

Malleable~

#### ①牌号

KT300-6, KTZ700-02

KT350-10、KTZ600-3

铁素体可锻铸铁以“KT”表示。  
珠光体可锻铸铁以“KTZ”表示。  
两组数字表示最低抗拉强度和延伸率。

#### ②加工过程

白口铸铁退火得到

**第一步** 先铸造成白口铸铁。

不允许有石墨出现，否则在随后的退火中，碳在已有的石墨上沉淀，得不到团絮状石墨；

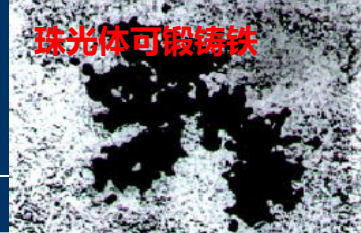
**第二步** 石墨化退火处理。

将白口铸铁加热到 $900^{\circ}\text{C} \sim 960^{\circ}\text{C}$ ，长时间保温，使共晶渗碳体分解为团絮状石墨，完成第一阶段的石墨化过程。

第二阶段、第三阶段石墨化，在 $650^{\circ}\text{C} \sim 700^{\circ}\text{C}$ 出炉冷却至室温，得到铁素体基体可锻铸铁。

若第一阶段石墨化后以较快的速度 ( $100^{\circ}\text{C/h}$ ) 冷却通过共析转变温度区，得到珠光体基体可锻铸铁。

珠光体可锻铸铁



铁素体可锻铸铁

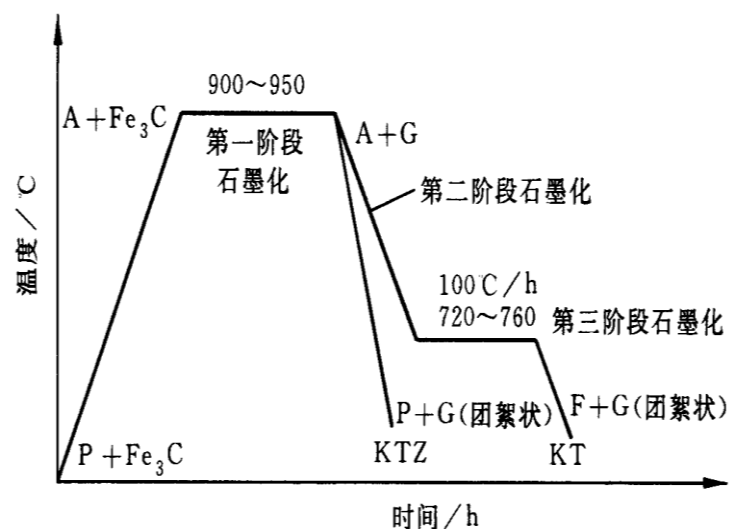


图 3-21 黑心可锻铸铁的石墨化退火工艺曲线



## 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

#### 2、常用铸铁

#### 可锻铸铁应用:

制造形状复杂、承受冲击和振动载荷的零件，如汽车拖拉机的后桥外壳、管接头、低压阀门等。

这些零件用铸钢生产时，因铸造性不好，工艺困难；用灰铸铁时，性能不能满足要求。



300型变速箱体  
Gearbox housing of  
Tractor Model DF-300



200型变速箱体  
Gearbox housing of  
Tractor Model DF-200



300型后桥壳体  
Rear axle housing of  
Tractor Model DF-300



204主传动壳体  
Main Drive Case  
of Tractor Model  
DF-204



300型半轴套管  
Half shaft housing of  
Tractor Model DF-300



300型提升器壳体  
Hydraulic power lift  
housing of Tractor  
Model DF-300



250型后桥壳体  
Rear axle housing of  
Tractor Model DF-250



12型变速箱体  
Gearbox housing of Power  
tiller/Walking Tractor  
Model DF-12



## ● 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

### 3.3.2 铸铁

#### 2、常用铸铁

#### 5) 特殊性能铸铁(alloyed cast irons)

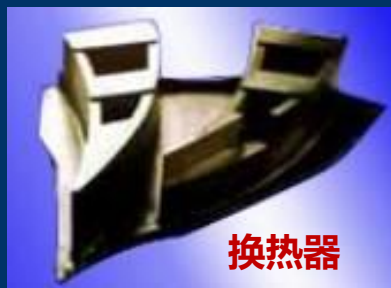
##### 耐磨铸铁

加入Cr、Mo、W、Cu等合金元素，提高基体强度和韧性，铸铁的耐磨性能等得到更大提高。



##### 耐热铸铁

加入Al、Si、Cr，铸件表面形成致密的氧化膜，阻碍继续氧化改善铸铁的耐热性。制造高温下工作的炉底板、换热器、坩埚、热处理炉内的运输链条。



##### 耐蚀铸铁

加Si、Cr形成保护膜提高基体电位。主要用于化工部件，如阀门、管道、泵、容器等。



## ● 课堂小测试

7. 机架和机床床身应选用( b )。

- (a) 白口铸铁
- (b) 灰口铸铁
- (c) 麻口铸铁

不可以的，因为它里面有石墨，锻造的时候石墨发生滑移，形成片状缺陷，性能会下降

8. 判断正误

(1) 可锻铸铁可在高温下进行锻造加工。(X)

(2) 铸铁可以通过再结晶退火使晶粒细化，从而提高其机械性能。(X)

➤ 孕育处理：细化晶粒

➤ 完全退火(重结晶退火)只适合亚共析钢，可消除铸钢的魏氏组织；

### ● 3.3 铸钢与铸铁(cast steels and cast irons)

#### 本节小结

##### 常用铸钢

ZG230-450

ZG270-500

ZG310-570

制造形状复杂、需要一定强度、塑性和韧性的零件。

##### 常用铸铁

HT150、HT250

QT420-10、QT800-2

KT350-10、KT450-5

##### 要求：

- ◆ 熟悉铸钢、铸铁的牌号、热处理、组织及应用
- ◆ 掌握铸铁的石墨化过程、石墨的形态及其对性能的影响

## 3.4 有色金属及其合金

### 3.4.1 铝及铝合金

$$T_{\text{再}} = (0.35 \sim 0.4) T_{\text{熔点}}$$

#### 特点:

##### (1) 密度小、比强度高

纯铝密度为  $2.7\text{g/cm}^3$ ，为铁的1/3。铝合金密度小，强度与低合金高强钢强度相近，比强度比一般高强钢高得多。

##### (2) 有优良的物理、化学性能

铝的导电性好，仅次于银、铜和金，在室温时的导电率约为铜的64%。  
铝及铝合金有相当好的抗大气腐蚀能力，磁化率极低，接近于非铁磁性材料。

##### (3) 加工性能良好

铝及铝合金(退火状态)的塑性很好，可以冷成形。  
超高强铝合金成形后可通过热处理获得很高的强度。  
铸铝合金的铸造性能极好。



## 3.4 有色金属及其合金

### 3.4.1 铝及铝合金

#### 1、纯铝

#### 2、铝合金

##### 1) 变形铝合金

- **不可热处理强化的铝合金** 成分低于 $F$ 的合金，不能进行热处理强化。
- **可热处理强化的铝合金** 成分位于 $F-D$ 之间的合金，可进行固溶 - 时效强化。

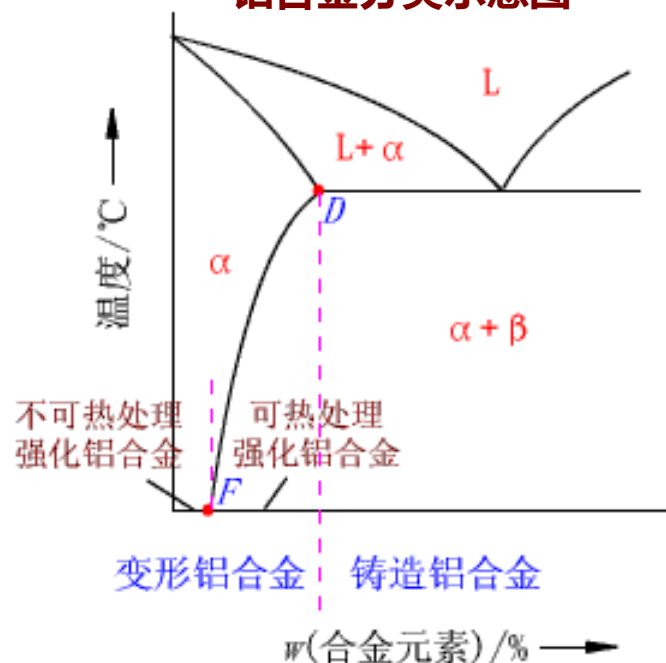
##### 2) 铸造铝合金

成分高于 $D$ 的合金，由于冷却时有共晶反应发生，流动性较好，适于铸造生产，称为铸造铝合金。

(纯)铝：铝的质量分数不小于**99.00%**的金属。  
工业纯铝 纯度 **98.0~99.0%**

成分低于 $D$ 的合金，加热时能形成单相固溶体组织，塑性较好，适于变形加工，称为变形铝合金。

铝合金分类示意图



## 3.4 有色金属及其合金

### 3.4.1 铝及铝合金

#### 2、铝合金

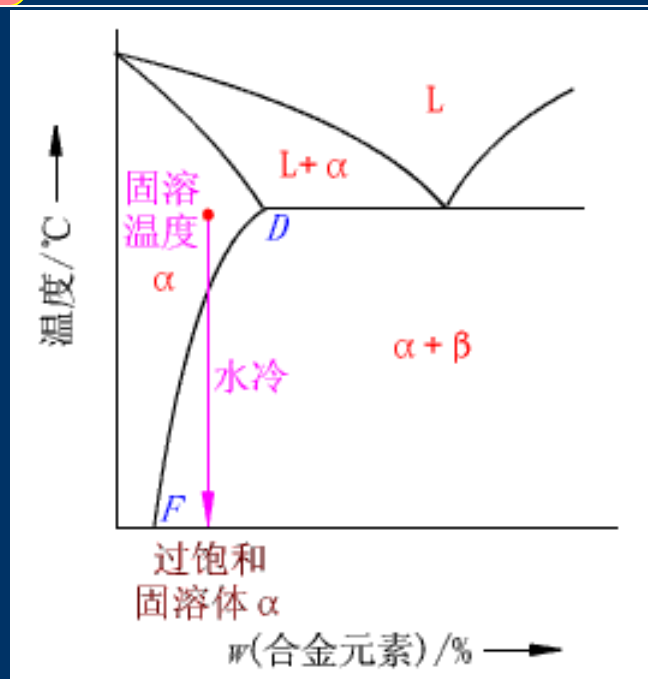
#### ☆ 重点内容

##### (1) 固溶处理

将成分位于 $D \sim F$ 之间的合金加热到 $\alpha$ 相区, 保温获得单相 $\alpha$ 固溶体, **迅速水冷**, 在室温得到**过饱和的 $\alpha$ 固溶体**, 这种处理方式称**固溶处理**。

##### (2) 时效

固溶处理的过饱和 $\alpha$ 固溶体不稳定, 有分解出强化相过渡到稳定状态的倾向。室温或低温加热时, 强度和硬度会明显升高。称为**时效或时效硬化**。



#### 铝合金的固溶处理

**自然时效** 室温下进行。  
**人工时效** 加热时进行。

## 3.4 有色金属及其合金

### 3.4.1 铝及铝合金

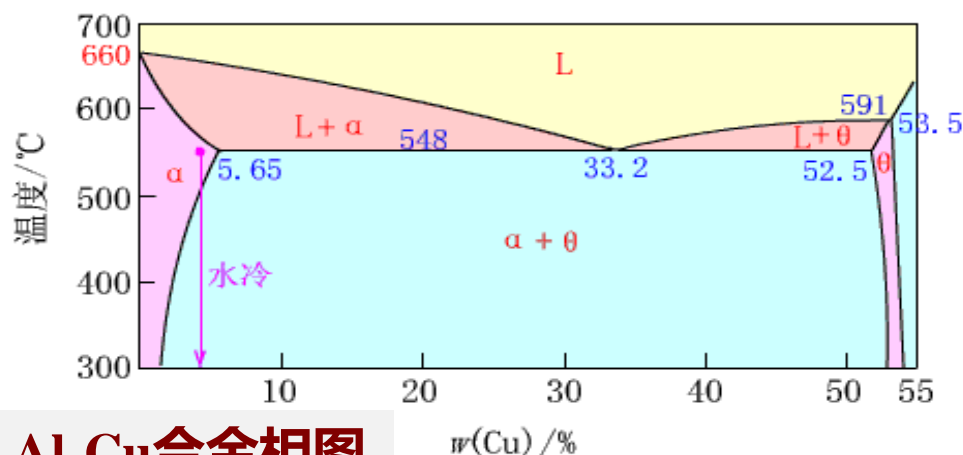
#### 2、铝合金

含4%Cu的Al-Cu合金, 加热到550 °C保温后, 在水中快冷,  $\theta$ 相( $\text{CuAl}_2$ )来不及析出, 合金获得过饱和的 $\alpha$ 固溶体组织, 强度为

$$\sigma_b = 310 \text{ MPa}$$

在室温放置, 随着时间强度逐渐提高, 经4天~5天后  $\sigma_b$ 可达420 MPa。

举例:



Al-Cu合金相图

### (3) 合金发生时效的条件

- 合金在高温形成均匀的固溶体。
- 固溶体中溶质的溶解度必须随温度的降低而显著降低。

## 3.4 有色金属及其合金

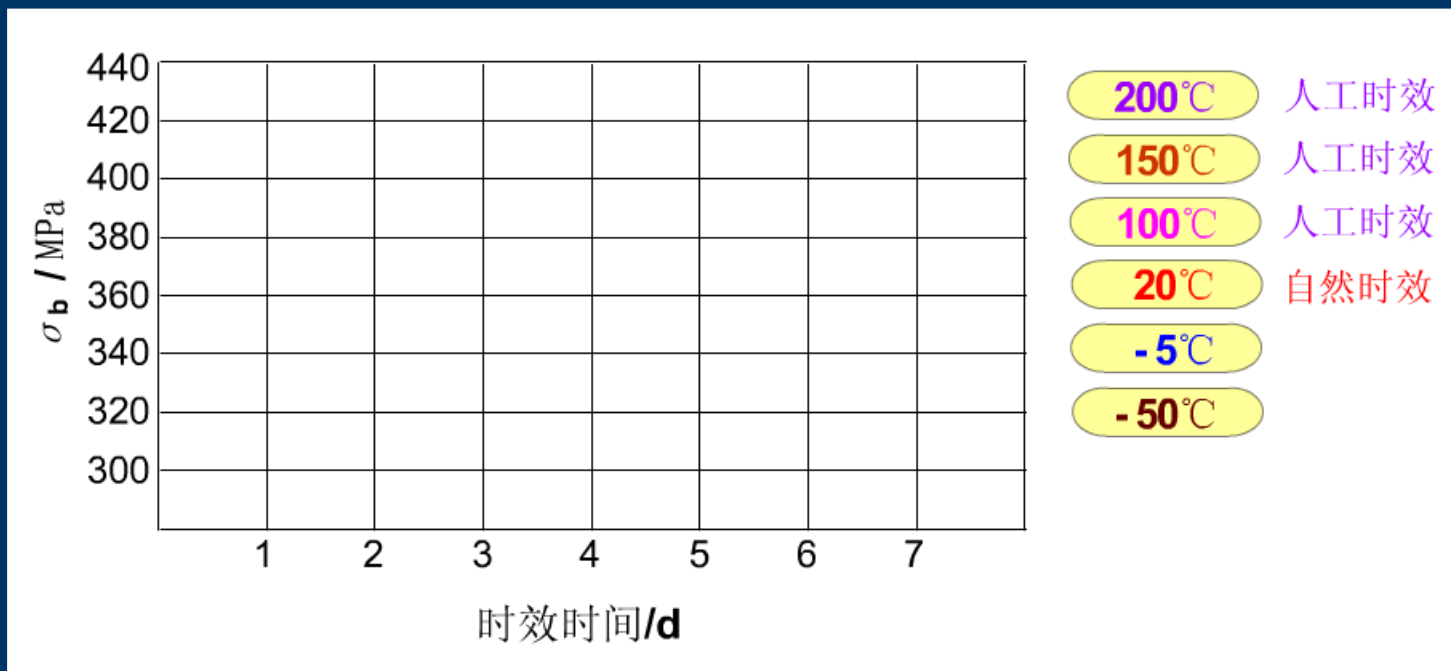
### 3.4.1 铝及铝合金

#### 2、铝合金

## Al-Cu合金时效

#### (4) 时效规律：

- 低温抑制时效的进行；
- 时效温度高，**强化效果小**；
- 时效温度高，**时效速度越快**。





## ● 3.4 有色金属及其合金

### 3.4.1 铝及铝合金

#### 2、铝合金

##### (5) 回归

自然时效后的铝合金，在 $230^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$ 短时间加热后，快速水冷至室温，重新变软。

在室温下又能发生自然时效。称为**回归**。

**老师提示:** 时效后的铝合金回归处理,软化状态进行冷变形。可用铝合金铆钉随时进行飞机的铆接和修理等。

### 3.4 有色金属及其合金

热处理  
强化

固溶处理  
时效硬化  
回归

#### 3.4.1 铝及铝合金

#### 2、铝合金

#### 1) 变形铝合金

新牌号采用四位字符体系，每一系列的第一位数字表示主要的合金元素，第三位和第四位数字表示合金编号，第二位数字或英文字母表示合金的改型。

- ◆ 1、3、5和部分4系列铝合金属于不可热处理强化铝合金。
- ◆ 2、6、7、8和部分4系列铝合金属于可热处理强化铝合金。

#### GB/T 16474 变形铝及铝合金牌号表示方法

Designation system for wrought aluminum and aluminum alloy

牌号系列	组别	热处理强化
1×××	纯铝（铝含量不小于99.00%）	不可
2×××	以铜为主要合金元素的铝合金	可以
3×××	以锰为主要合金元素的铝合金	不可
4×××	以硅为主要合金元素的铝合金	若含镁,则可
5×××	以镁为主要合金元素的铝合金	不可
6×××	以镁和硅为主要合金元素并以Mg <sub>2</sub> Si相为强化相的铝合金	可以
7×××	以锌为主要合金元素的铝合金	可以
8×××	以其他合金为主要合金元素的铝合金	可以
9×××	备用合金组	

## 3.4 有色金属及其合金

### 3.4.1 铝及铝合金

#### 2、铝合金

#### 1) 变形铝合金

表3-33 变形铝合金加工状态表示方法

代号	加工状态	代号	加工状态
O	退火状态	T4	固溶处理，自然时效
H	加工硬化状态	T5	自热加工温度冷却，人工时效
W	固溶处理态	T6	固溶处理，人工时效
T	时效硬化态	T7	固溶处理，过时效稳定化
T1	自热加工温度冷却，自然时效	T8	固溶处理，冷加工，人工时效
T2	自热加工温度冷却，冷加工，自然时效	T9	固溶处理，人工时效，冷加工
T3	固溶处理，冷加工，自然时效	T10	自热加工温度冷却，冷加工，人工时效

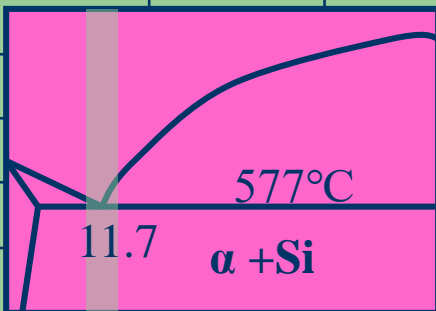
## 3.4 有色金属及其合金

### 3.4.1 铝及铝合金

### 2、铝合金

### 2) 铸造铝合金

GB/T 1173-2013 铸造铝合金 (Casting aluminum alloy)

种类	代号	成分				铸造方法	热处理	应用	
		Si	Cu	Mg	Zn				
铝硅合金	ZL102	10-13	0	0	0	金属模 铸造	T2	不受力的仪表盘壳体	
	ZL101	6.5~7.5					T1 T4 T5 T6 T7 (见表3-35)	铸造性能很好, 适于制造形状复杂但强度要求不高的铸件, 用于制造仪表、水泵及电动机壳体、气缸体、活塞等	
	ZL104	8~10.5							
	ZL105	4.5~5.5							
	ZL107	6.5~7.5							
	ZL109	11~13							

铸造铝硅合金又叫硅铝明(Silumin)。仅含有Si和Al合金的铸造铝合金叫简单硅铝明。

简单硅铝明 (ZL102) 的铸态组织为 $\alpha$ 固溶体和粗针状Si, 需要变质处理。

特殊硅铝明为加入Cu、Mg等元素的硅铝明, 形成 $\text{CuAl}_2$ 、 $\text{Mg}_2\text{Si}$ 等强化相, 提高材料的强度, 其既需要变质处理, 也可进行热处理。

3. 4 有色金属及其合金

3.4.1 铝及铝合金

2、铝合金

2) 铸造铝合金

GB/T 1173-2013 铸造铝合金（Casting aluminum alloy）

种类	代号	成分				铸造方法	热处理	应用
		Si	Cu	Mg	Zn			
铝铜	ZL201		4.5~5.3			金属模铸造	T1 T4 T5 (见表3-35)	强度高，耐热，铸造性差，密度大，耐蚀性较差。用于制造 内燃机气缸头、汽车活塞
	ZL203		4.0~5.0					
铝镁	ZL301			9.5~11		砂模铸造		强度高，密度小，耐蚀性好，铸造性差，耐热性低，用于制造舰船配件、氨用泵体等
	ZL303			4.5~5.5				
铝锌	ZL401				9~13	变质处理		价廉，铸造性好，抗蚀性差，热裂倾向大，用于制造车辆发动机零件及仪器元件和日用品
	ZL402				5~6.5			

种类	代号	铸造性能	密度	强度	耐蚀性	耐热性	价格
铝铜合金	ZL20X	不好	高	高	不好	好	-
铝镁合金	ZL30X	不好	低	高	好	不好	-
铝锌合金	ZL40X	好	高	高	不好	不好	便宜

## 3.4 有色金属及其合金

### 3.4.2 铜及铜合金

#### 1、纯铜（紫铜）

#### 2、铜合金

种类	牌号	成分		用途
		Cu	Zn	
普通黄铜	H80	~80	余量	薄壁管、装饰品
	H59	~59		螺帽、垫圈
	H62	~62		散热器

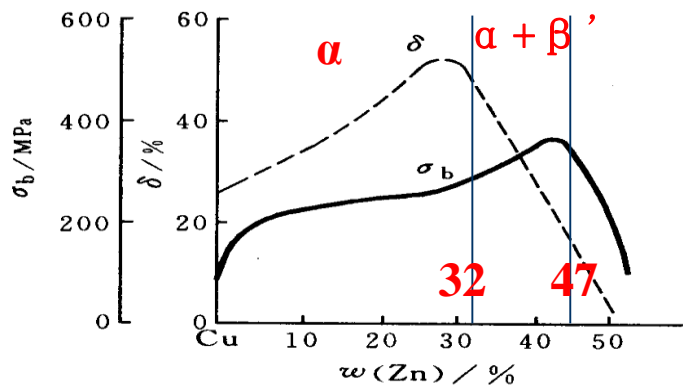
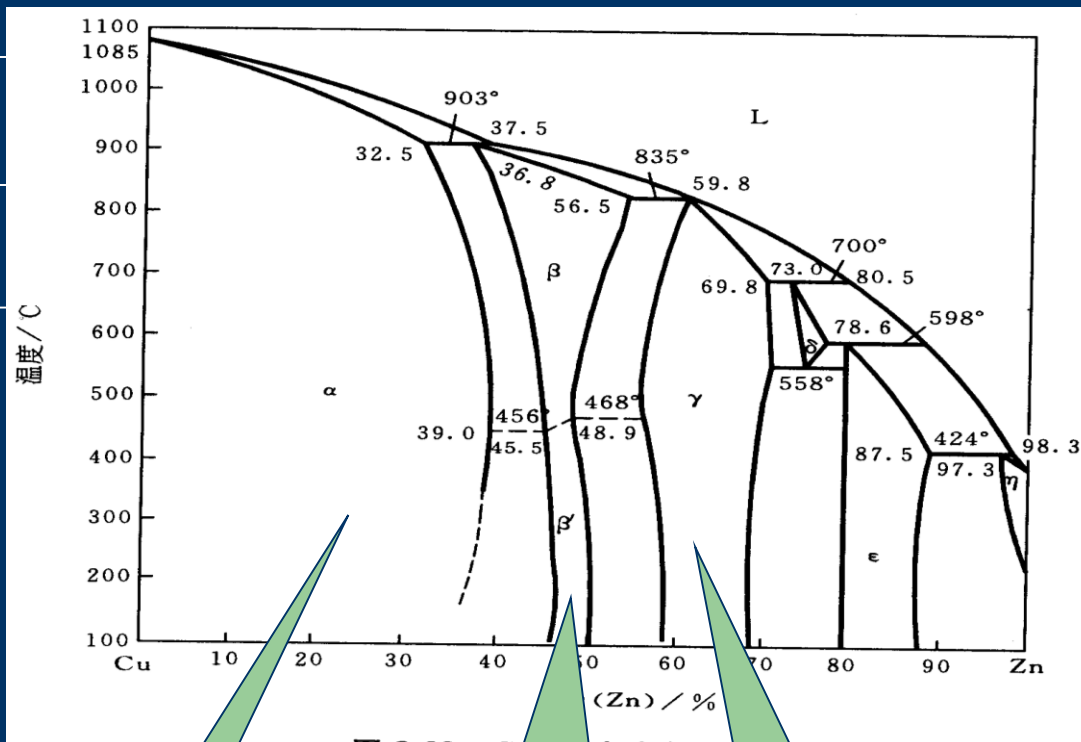


图 3-31 黄铜的机械性能与锌含量的关系



锌质量分数超过50%的铜锌合金无实际使用价值，太脆。工业黄铜的实际锌质量分数不超过47%，其退火组织可以是单相  $\alpha$  或双相  $\alpha + \beta'$ ，分别称为单相黄铜和双相黄铜。

## 3.4 有色金属及其合金

### 3.4.2 铜及铜合金

#### 2、铜合金

##### 1) 黄铜

在铜、锌合金中加入铅、锡、铝、硅、锰、铁、镍等合金元素形成**复杂黄铜**，以提高强度和耐蚀性。

**铅黄铜**切削加工性能好，主要用作钟表零件。其余复杂黄铜对空气和海水的耐蚀性好，主要在船舶上使用。

GB/T 5231-2012 加工铜及铜合金牌号和化学成分

Designation and chemical composition of wrought copper and copper alloys

种类	组别	牌号	成分									用途
			Cu	Zn	Pb	Sn	Al	Si	Mn	Fe	Ni	
复杂黄铜	铅黄铜	HPb63-3	62-65	余量	2.4-3							钟表零件、一般机器零件
	锡黄铜	HSn90-1	88-91			0.25-0.75						船舶零件、车辆弹性套管
	铝黄铜	HAl77-2	76-79				1.8-2.5					船舶冷凝器管、耐蚀零件
	硅黄铜	HSi80-3	79-81					2.5-4.0				耐磨零件、船舶及化工零件
	锰黄铜	HMn58-2	57-60						1.0-2.0			船舶零件、轴承、耐蚀零件
	铁黄铜	HFe59-1-1	57-60						0.5-0.8	0.6-1.2		海水腐蚀工况下的零件
	镍黄铜	HNi65-5	64-67								5.0-6.5	船舶冷凝器管、电机零件

### 3.4 有色金属及其合金

#### 3.4.2 铜及铜合金

#### 2、铜合金

#### 2) 青铜

除了黄铜、白铜之外的铜基合金

硅青铜雕塑



铝青铜轴套



龟鹤青铜器  
明皇室吉祥物



GB/T 5231-2012 加工铜及铜合金牌号和化学成分

Designation and chemical composition of wrought copper and copper alloys

GB/T 1176-2013 铸造铜及铜合金 (Casting copper and copper alloys)

铜合金	组别	牌号	成分								应用
			Cu	Sn	Al	Be	Si	Pb	Ni	其他	
青铜	锡青铜	QSn4-3	余量	3.5-4.5						W(Zn)=2.7-3.3	弹簧、抗磁零件
		ZCuSn10P1	余量	9-11.5						W(P)=0.8-1.1	水管附件、轴承, 工艺品
	铝青铜	QAl9-4	余量		8-10					W(Fe)=2.0-4.0	耐磨零件
		ZCuAl9-2	余量		8-10					W(Mn)=1.5-2.5	轴承、轴套
	硅青铜	QSi3-1	余量				2.7-3.5				弹簧、涡轮、涡轮杆
	铅青铜	ZCuPb30	余量					27-33			高速发动机的轴承
	铍青铜	TBe1.9	余量			1.85-2.1				W(Cu)=96-99.3	重要的弹性元件、电极

铍青铜:  $W(\text{Be})=(1.7\sim2.5)\%$ 。高弹性,抗疲劳,电阻小,无磁性,受冲击无火花。



## 3.4 有色金属及其合金

### 3.4.2 铜及铜合金

#### 2、铜合金

#### 3) 白铜

以镍为主要合金的铜合金



老白铜酒壶  
民国时期

GB/T 5231-2012 加工铜及铜合金牌号和化学成分

Designation and chemical composition of wrought copper and copper alloys

铜合金	组别	牌号	成分						应用
			Cu	Sn	Al	Be	Si	Ni+Co	
白铜	普通白铜	B25						24.0 -26.0	船舶、化工仪器零件
	锌白铜	BZn15-20						13.5-16.5	抗腐蚀仪表零件
	锰白铜	BMn3-12						2.0-3.5	弹簧

- ❖ 二者无限互溶,形成单向固溶体,抗蚀性及塑性好
- ❖ 普通白铜含镍量越高,颜色越白,  $W(\text{Ni}) > 16\%$ 时接近银的颜色。
- ❖ 锌白铜15世纪已在中国使用。

## ● 3.4 有色金属及其合金

### 3.4.3 钛及钛合金

钛及钛合金具有密度小、质量轻、比强度高、耐高温、耐腐蚀以及良好低温韧性等优点。

资源丰富，有广泛应用前景。

但目前钛及钛合金的加工条件复杂，成本较昂贵。



钛的耐蚀性管道



纯钛笔记本电脑外壳



钛合金球拍

## ● 3.4 有色金属及其合金

### 3.4.3 钛及钛合金

#### 1、纯钛

GB/T 3620.1-2007 钛及钛合金牌号和化学成分

Designation and composition of titanium and titanium alloys

GB/T 2965-2007 钛及钛合金棒材

组别	牌号	成分	室温机械性能			应用
			热处理	$\sigma_b$	$\delta$	
工业纯钛	TA1	Ti (杂质极微)	退火	240	24	在350℃以下工作, 强度要求
	TA2	Ti (杂质微)	退火	400	20	

- 1、晶体结构：两种同素异构体。**882℃**以下,  $\alpha$ -Ti(密六), **882℃**以上,  $\beta$ -Ti (体心)。
- 2、密度较小(**4.51g/cm<sup>3</sup>**)，纯钛的强度较低，合金的比强度较高。
- 3、钛在大气和海水中有优良的耐蚀性，在硫酸、盐酸、硝酸、氢氧化钠中都很稳定。
- 4、低温性能很好，在液氮温度(**-196℃**)下仍具有良好的机械性能。
- 5、塑性好，容易加工成型，可制成细丝和薄片。
- 6、导热系数比铁低**4.5**倍，线膨胀系数也比较低。
- 7、唯一无毒且与人体组织和血液有良好相容性的金属。

$\alpha$  钛合金：含有铝、硼  $\alpha$  稳定剂，在室温状态基体为 $\alpha$  相的钛合金。

$\beta$  钛合金：含有足够多的  $\beta$  稳定剂（钼、钒、铬），在适当的冷却速度下能使其室温组织全部为 $\beta$  相的钛合金。

$(\alpha+\beta)$  钛合金：含有较多的  $\beta$  稳定剂，在室温状态由 $\alpha$ 及 $\beta$ 相所组成的钛合金。

GB/T 2965-2007 钛及钛合金棒材（Titanium and titanium alloy bars）

组别	牌号	成分	室温机械性能			应用
			热处理	$\sigma_b$	$\delta$	
$\alpha$ 钛合金	TA5	Ti-4Al-0.005B	退火	685	15	在500 °C以下工作的零件，如导弹的燃料罐、超音速飞机的涡轮机匣。
	TA6	Ti-5Al	退火	685	10	
$\beta$ 钛合金	TB2	Ti-5Mo-5V-8Cr-3Al	淬火+时效	1370	7	在350 °C以下~适于制造压气机叶片、轴、轮盘等重载的回转件，以及飞机构件等。
$(\alpha+\beta)$ 钛合金	TC1	Ti-2Al-1.5Mn	退火	585	15	在400 °C以下工作的零件要求一定高温强度的发动机零件，低温下使用的火箭、导弹的液氢燃料箱部件等。
	TC2	Ti-4Al-1.5Mn	退火	685	12	
	TC3	Ti-5Al-4V	退火	800	10	
	TC4	Ti-6Al-4V	退火	895	10	

1、 $\alpha$ 比 $\beta$ 钛合金强度低,但高温强度高。

2、 $\beta$ 钛合金强度高。

3、 $(\alpha+\beta)$ 钛合金塑性好，强度较高。

蛟龙号载人潜水器于2012年6月27日在西太平洋马里亚纳海沟（深10911米）成功到达7062米，材料主要使用高强度钛合金。

3.4 有色金属及其合金

3.4.4 镁及镁合金

相对密度1.74，目前为最轻的金属结构材料。  
有变形～、铸造～和压铸～等种类。

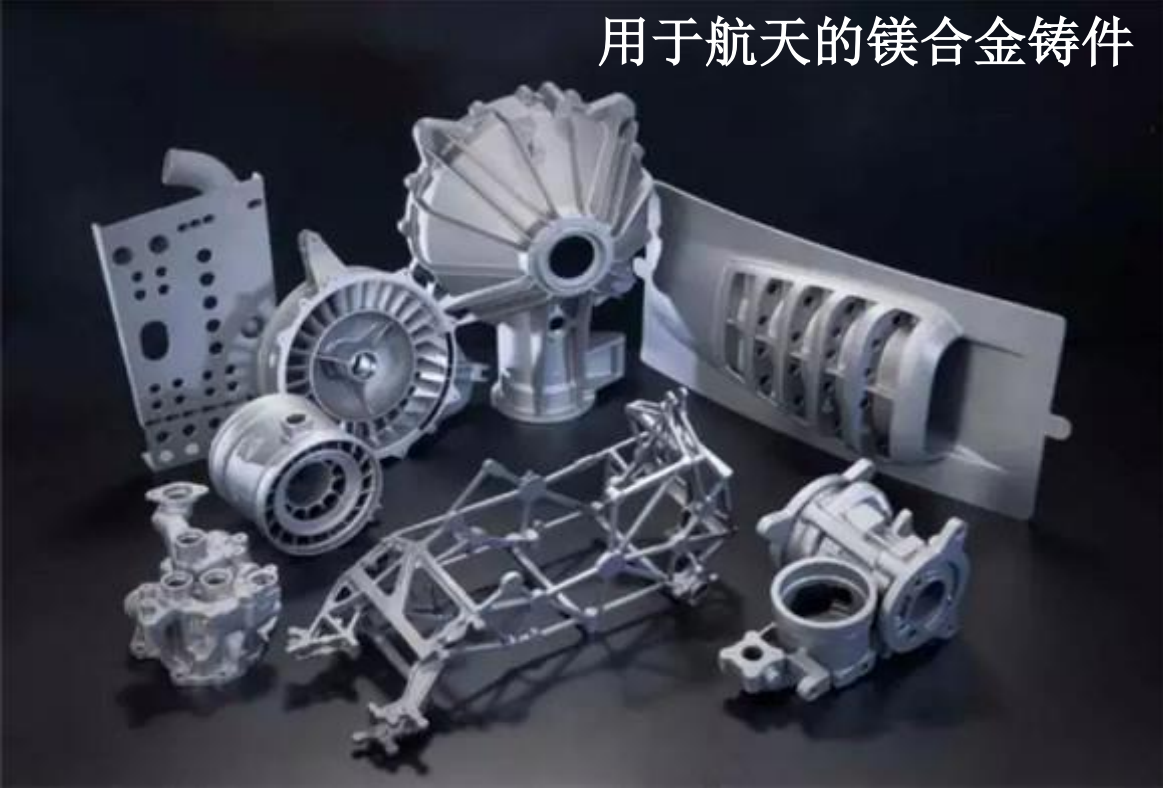
GB/T 5153-2003 变形镁及镁合金牌号和化学成分

Designation and composition of wrought magnesium and magnesium alloys

组别	牌号	成分					应用
		Mg	Al	Zn	Mn	Zr	
Mg	Mg99.95	≥99.95%					用于航天的镁合金铸件
MgAlZn	AZ40M	余量					
MgMn	M2S	余量					
MgZnZr	ZK61M	余量					

GB/T 19078-2003 铸造镁合金牌号和化学成分

组别	牌号	成分	
		Mg	
MgAlZn	AZ81A	余量	
MgAlMn	AM20S	余量	
MgZnZr	ZK51A	余量	
MgZr	K1A	余量	



## ● 3.4 有色金属及其合金

### 3.4.5 镍及镍合金

耐腐蚀、耐高温、塑性好；**比重大、价格贵**

#### 1、Ni-Cu系耐腐蚀镍合金

蒙乃尔400合金： $w(\text{Ni})=66\%$ 、 $w(\text{Cu})=30\%$ ，单相固溶体，它是一种用量最大、用途最广、综合性能极佳的耐蚀合金。

在氢氟酸和氟气介质中具有优异的耐蚀性，对热浓碱液也有优良的耐蚀性。同时还耐中性溶液、水、海水、大气、有机化合物等的腐蚀。

主要用于阀杆、泵轴和叶轮、油井钻环，热交换器，阀垫等。

蒙乃尔K-500合金：含有 $w(\text{Al})=3\%$ 、 $w(\text{Ti})=0.6\%$ ，可时效强化，强度提高1倍。

蒙乃尔合金主要通过压力加工成型或铸造成型

## 3.4 有色金属及其合金

### 3.4.5 镍及镍合金

耐腐蚀、耐高温、塑性好；**比重大、价格贵**

#### 2、镍基高温合金

#### 3、粉末冶金镍基高温合金（略）

GBT 14992-2005 高温合金和金属间化合物高温材料的分类和牌号-镍基变形高温材料

牌号	成分（质量分数/%）					应用
	C	Cr	NI	W	...	
<b>GH3030</b>	≤0.12	19.0-22.0	余量	-		固溶强化，800℃以下涡轮发动机燃烧室
<b>GH3044</b>	≤0.10	23.5-26.5	余量	13.0-16.0		固溶强化，850-900℃涡轮发动机燃烧室
<b>GH4037</b>	0.03-0.10	13.0-16.0	余量	5.0-7.0		沉淀强化，800-850℃涡轮叶片
<b>GH4049</b>	0.04-0.10	9.5-11.0	余量	5.0-6.0		沉淀强化，900℃以下燃气轮机叶片

GBT 14992-2005 高温合金和金属间化合物高温材料的分类和牌号-镍基铸造高温材料

牌号	成分（质量分数/%）					说明
	C	Cr	NI	W	...	
<b>K403</b>	0.11-0.18	10.0-12.0	余量	4.8-5.5		等轴晶镍基铸造高温合金
<b>DZ404</b>	0.10-0.16	9.0-10.0	余量	5.1-5.8		定向凝固镍基铸造高温合金
<b>DD403</b>	≤0.10	9.0-10.0	余量	5.0-6.0		单晶镍基铸造高温合金



## 3.4 有色金属及其合金

### 3.4.6 轴承合金

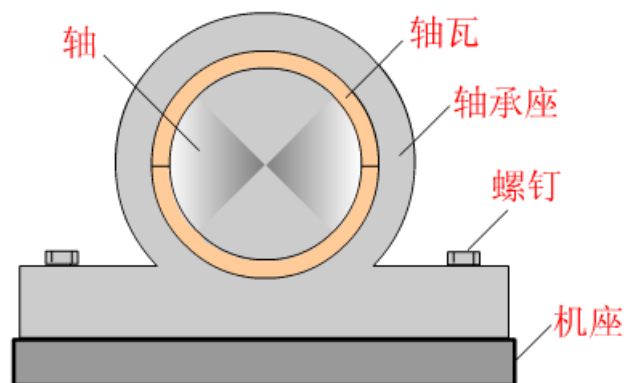
滚动轴承钢：GCr15、GCr15SiMn



**滑动轴承是汽车、拖拉机、机床及其它机器中的重要部件。**

**轴承合金是制造滑动轴承中的轴瓦及内衬的材料。**

**滑动轴承支撑着轴，当轴旋转时，轴瓦和轴发生强烈的摩擦，并承受轴颈传给周期性载荷。**



**滑动轴承的结构**



## 3.4 有色金属及其合金

### 3.4.6 轴承合金

#### 1、性能

足够的强韧性，承受压力、冲击、交变载荷

较小的热膨胀系数，良好的导热性，防咬合

较小的摩擦系数，良好的耐磨性和磨合性

#### 2、牌号

Z+基本元素符号+主加元素符号+主加元素含量

**ZSnSb11Cu6**: 锡基铸造轴承合金  $w(\text{Sb-tl})$  锑=11%,  $w(\text{Cu})=6\%$

#### 3、种类

锡基轴承合金(锡基巴氏合金)

铅基轴承合金(铅基巴氏合金)

铜基轴承合金

铝基轴承合金

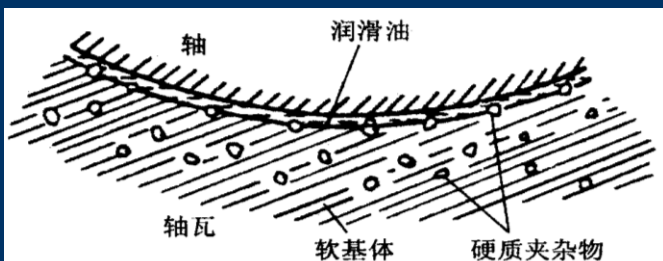


图 3-38 软基体硬质点轴瓦与轴的接触面

### 3.4 有色金属及其合金



GB/T 1174-1992 铸造轴承合金 (Cast bearing metals)

种类	名称	牌号	成分					基体	质点	应用
			Sn	Sb	Cu	Pb				
锡基轴承合金	锡基巴氏合金	ZSnSb11Cu6	余量	10-12	5.5-6.5			软	硬	汽轮机、发动机的高速轴瓦
		ZSnSb8Cu4	余量	7-8	3-4					
		ZSnSb4Cu4	余量	4-5	4-5					

显微组织:  $\alpha + \beta' + \text{Cu}_6\text{Sn}_5$

- $\alpha$ 相: 黑色软基体。锑在锡中的固溶体。
- $\beta'$ 相: 白方块, 硬质点。以化合物SnSb为基的固溶体。
- $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ : 白针状或星状。树枝状 $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 先结晶, 阻止 $\beta'$ 上浮。硬度高, 作为硬质点, 提高强度和耐磨性。

性能: 摩擦系数小, 膨胀系数小, 导热性好。  
疲劳强度较低, 许用温度不高于150 °C  
应用: 使用最广, 制作最重要的轴承, 轴瓦;

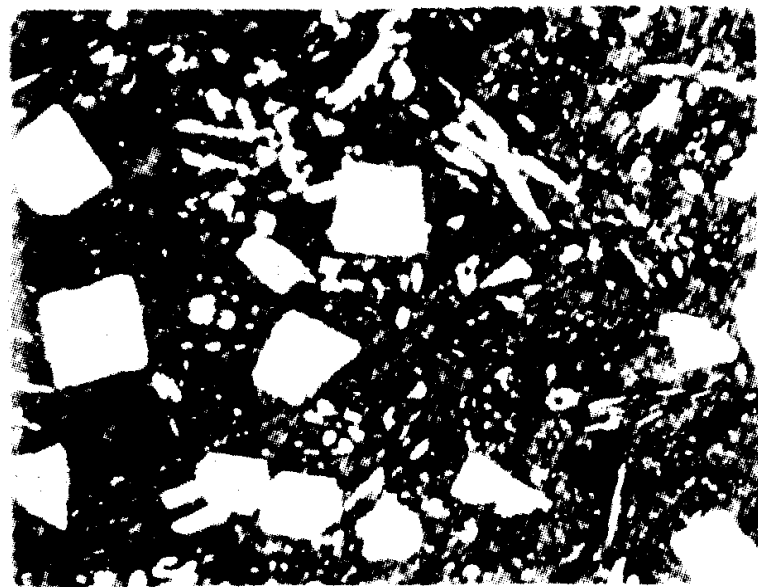


图 3-40 ZSnSb11Cu6 合金的显微组织

### ● 3.4 有色金属及其合金

GB/T 1174-1992 铸造轴承合金（Cast bearing metals）

种类	名称	牌号	成分					基体	质点	应用
			Sn	Sb	Cu	Pb				
铅基轴承合金	铅基巴氏合金	ZPbSb16Sn16Cu2	15-17	15-17	1.5-2	余量		软	硬	汽车、拖拉机曲轴的轴承
		ZPbSb10Sn6	5-7	9-11		余量				

**$(\alpha+\beta)$ ：**共晶体，为黑色软基体

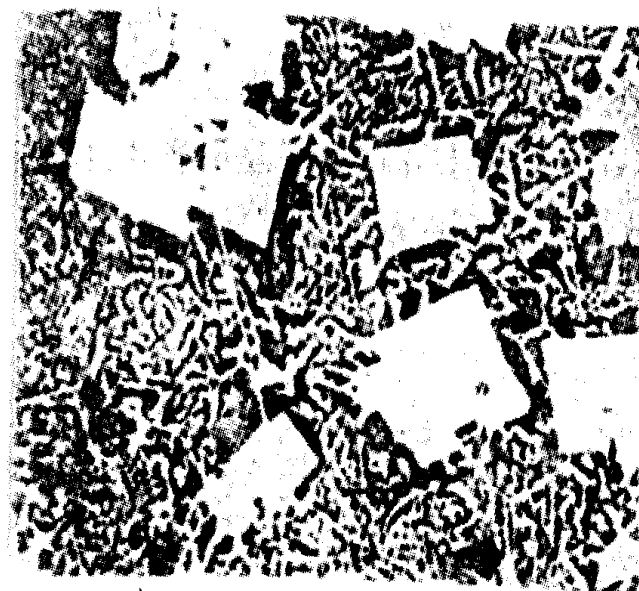
**$\beta$ ：**固溶体，脆且容易偏析，白色硬质点

**$\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ：**树枝状，防止 $\beta'$ 的上浮偏析

**性能：**铸造性能好，价格便宜（铅的价格约为锡的1/10），高温强度高

其它性能没有锡基轴承合金好

**应用：**制作一般轴承



ZPbSb16Sn16Cu2 轴承合金的显微组织

### ● 3.4 有色金属及其合金

GB/T 1174-1992 铸造轴承合金 (Cast bearing metals)

种类	名称	牌号	成分					基体	质点	应用
			Sn	Sb	Cu	Pb	P			
铜基轴承合金	铅青铜	ZCuPb30			余量	27-33		硬	软	航空发动机、高速柴油机的轴承等
		ZCuPb25Sn5	4-6		余量	18-23				
		ZCuPb15Sn8	7-9		余量	13-17				
	锡青铜	ZCuSn10P1	9-11.5		余量		0.5-1	软	硬	高速柴油机的轴承, 轴套等
		ZCuSn5Pb5Zn5	4-6		余量	4-6				

**ZCuPb30:** **Cu** : 为硬基体; **Pb** : 软质点

承载能力高, 疲劳强度大, 优良的耐磨性、导热性和摩擦系数, 重载高速轴承

**ZCuSn10P1:**  **$\alpha$** : 固溶体, 为软基体;  **$\delta + \text{Cu}_3\text{P}$** : 硬质点

承载能力高, 疲劳强度大, 重载高速柴油机轴承

铝基轴承合金 (自学)

### ● 3.4 有色金属及其合金

#### 本节小结

##### 一般性了解：

常用**铝合金**：LF5、LY11、LC4、ZL102

常用**铜合金**：H80、H62、QSn6.5-0.1、  
QAl9-4、QBe2

常用**钛合金**：TA7、TB1、TC4

常用**镁合金**：AZ40M

常用**镍合金**：蒙乃尔K-500

常用**轴承合金**：ZChSnSb11-6

**掌握：固溶-时效 热处理强化方法；**

## 第3章 小结

要求：熟练掌握碳钢/合金钢的成分、热处理、组织和应用

### 1. 碳钢

普通碳素结构钢 Q215、Q235 (建筑构件、桥梁焊接件等)

优质碳素结构钢 20、45、60 (冲压件、齿轮、轴类、套筒零部件, 调质)

碳素工具钢 T8、T10、T12 (刃具、模具, 球化退火、淬火+低温回火)

不同牌号的钢材其应用领域不同。

### 2. 合金钢 (合金结构钢制造各种结构件、机械零件。)

低合金结构钢 Q345(16Mn)、Q420(15MnVN) (大型构件、桥梁等焊接件)

渗碳钢 20Cr、20MnVB、20CrMnTi、18Cr2Ni4WA

(渗碳、球化退火、淬火+低温回火; 汽车/拖拉机变速齿轮、销、凸轮)

调质钢 40Cr、40CrB、40CrNiMo、38CrSi (调质-强韧性好、表面淬火)

弹簧钢 65Mn、50CrV、60Si2Mn (淬火+中温回火)

轴承钢 GCr9、GCr15、GCr15SiMn (正火+球化退火、淬火+低温回火)

**低合金刀具钢** 9SiCr、CrWMn

**高速钢** W18Cr4V

**热模具钢** 5CrMnMo、5CrNiMo、3Cr2W8V

**冷模具钢** Cr12MoV

**合金工具钢制造各种刀具、模具、量具。**

**不锈钢** 1Cr13、3Cr13、1Cr17、1Cr18Ni9Ti

(分马氏体、铁素体、奥氏体类型，根据耐蚀性、强度要求选材)

### 3. 铸钢 ZG230-450、ZG270-500、ZG310-570

制造形状复杂、需要一定强度、塑性和韧性的零件。

### 4. 铸铁：HT150、HT250、QT420-10、QT800-2、RuT420， RuT260 KT350-10、KT450-5、。

铸造性能好，制造形状复杂的零件。

**要求：**

- ◆ 熟悉铸钢、铸铁的牌号、热处理、组织及应用；
- ◆ 掌握铸铁的石墨化过程、石墨的形态及其对性能的影响；

## 5. 有色金属及其合金

具有特殊的机械性能和理化性能。

铝合金：5A05(LF5)、2A11(LY11)

7A04(LC4)、ZL102

铜合金：H80、H62、QSn6.5-0.1

QAl9-4、QBe2

钛合金：TA7、TB1、TC4

镁合金：AZ40M

镍合金：蒙乃尔K-500

锡基轴承合金：ZChSnSb11-6

- 可以为一般性了解；
- 掌握：固溶-时效 热处理强化方法；



## ● 课后作业

# 第八次作业： 铸铁

发到优慕课（北京化工大学在线综合教育平台）

**提交截止日期： 2023年4月14日**