



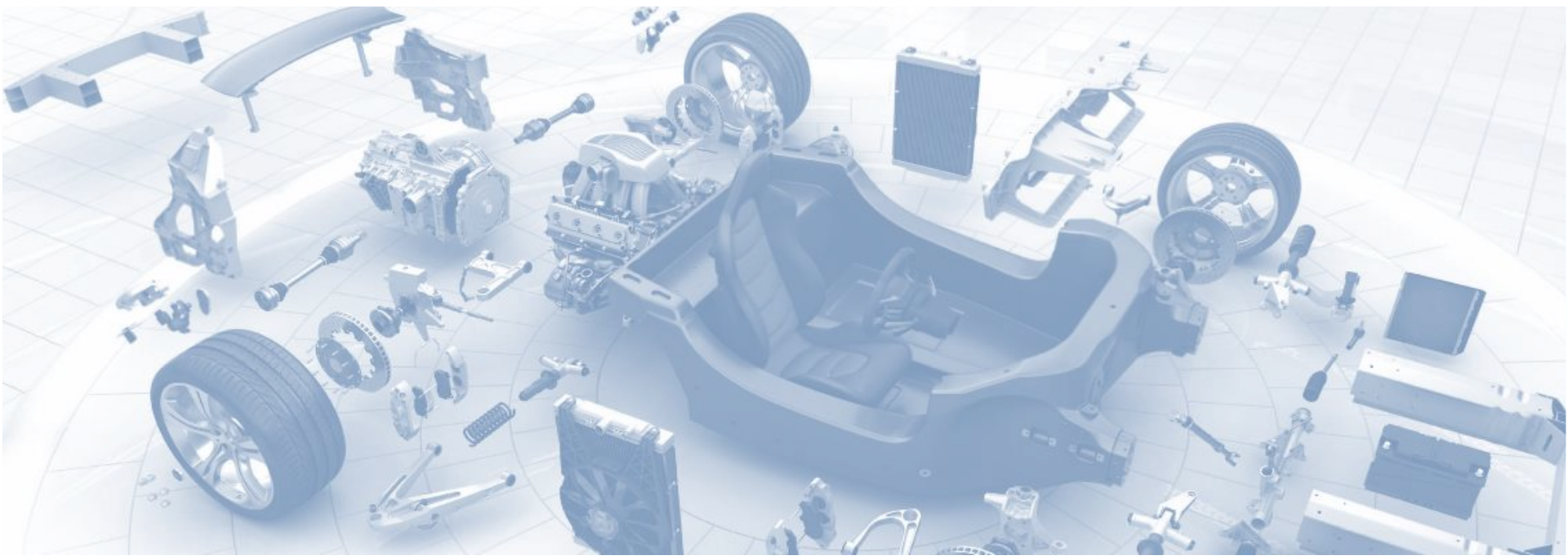
工程材料精品课程

第二篇 金属材料

第七章 有色金属及合金

华南理工大学---材料学院---金属系

2021年





课程框架

碳钢及铸铁，合金钢，**有色金属及合金**，陶瓷，功能玻璃，高分子

工程材料 的结构

- 晶体结构
- 晶体缺陷
- 相结构
- 相图与相变
- 显微组织

材料加工工艺

- 材料制备
- 材料成型
- 热处理

工程材料 的性能

- 力学性能
- 工艺性能
- 物理性能
- 化学性能



本章提纲

金属材料

黑色金属

有色金属

铝及合金

Cu
Mg
Mn
Si
Zn

铜及合金

紫铜
黄铜
青铜
新型铜合金

镁及合金

Al
Zn
Re

钛及合金

α -Ti
 β -Ti
 $(\alpha+\beta)$ -Ti

轴承合金

铅基
锡基
铜基
铝基

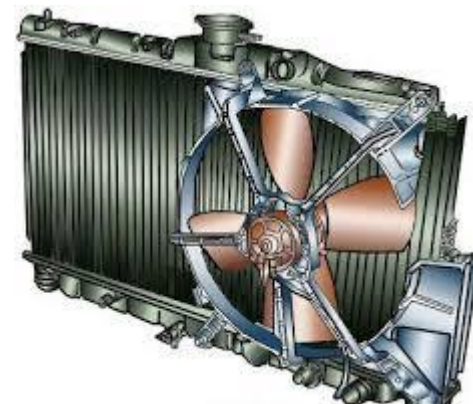
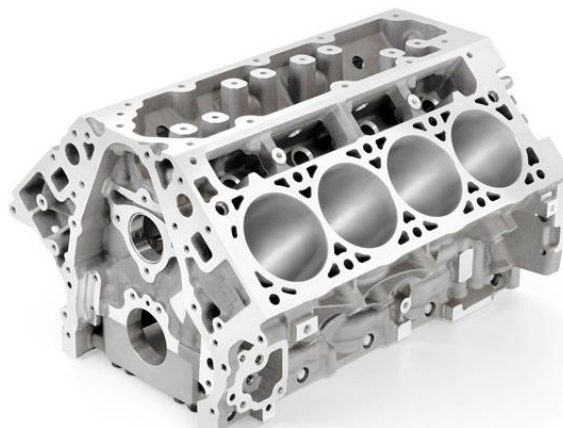


有色金属

在工业生产中，通常把**铁及其合金**称为黑色金属，把其他**非铁金属及其合金**称为有色金属

- **有色金属**具有许多优良的特性，如特殊的电、磁、热性能，耐蚀性能及高的比强度(强度与密度之比)等，已成为现代工业中不可缺少的金属材料







第一节 铝及其合金



1.1 铝

- 低的熔点 660.4°C
- 低的密度($2.72\text{g}/\text{cm}^3$) – 钢的三分之一
- 高的比强度
- 高的电导率- 纯铜的60%
- 高的热传导性
- 良好抗大气和耐酸腐蚀性
- FCC 晶体结构: 极好塑性和加工成型性
- 非磁性
- 无毒性



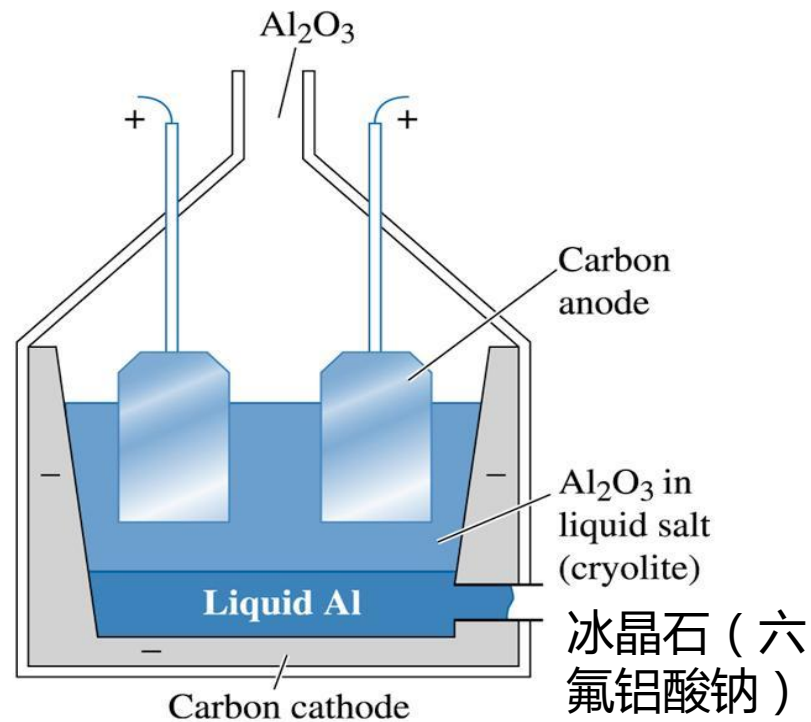
高的比强度，良好耐腐蚀性，高的电导率，以及无毒性



电解炼铝



电解铝车间



电解铝原理

1.2 铝合金的合金化原理及分类

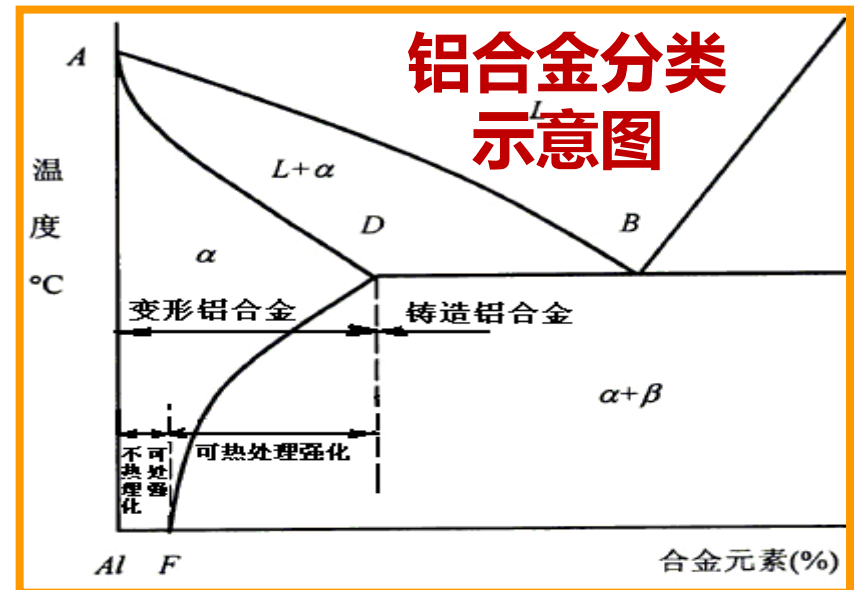
合金化

Al+Cu(Mg, Zn, Mn, Si)

固溶强化
析出强化
弥散强化

细晶强化
形变强化

铝合金



- 铝合金分为**变形铝合金**和**铸造铝合金**两大类
- 变形铝合金又分为**可热处理强化**和**不可热处理强化**两类

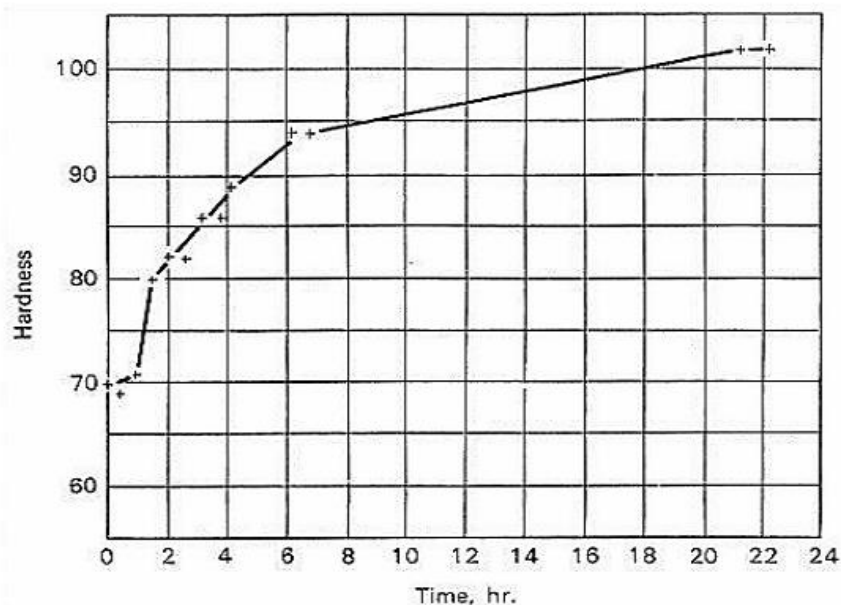


铝合金的强化手段

固溶强化：在Al中加入Cu、Mn、Mg、Zn、Si等，形成过饱和固溶体

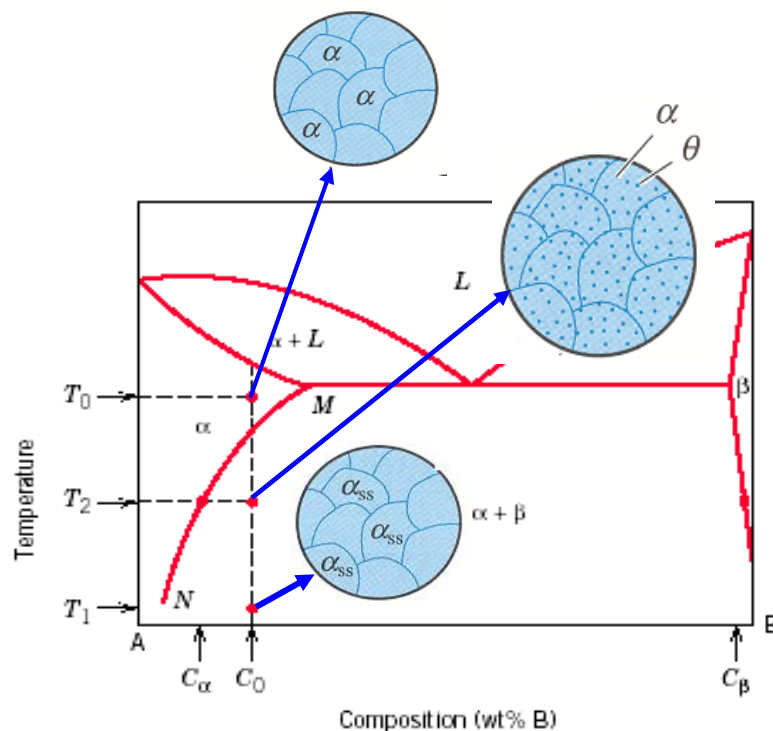
析出强化：过饱和固溶体中析出第二相，**时效处理**

德国工程师维尔姆1906年发现含4%铜的铝合金在室温下时效硬化，发明了杜拉铝，即硬铝，屈服强度可达400MPa，相当于低碳钢，震惊世界

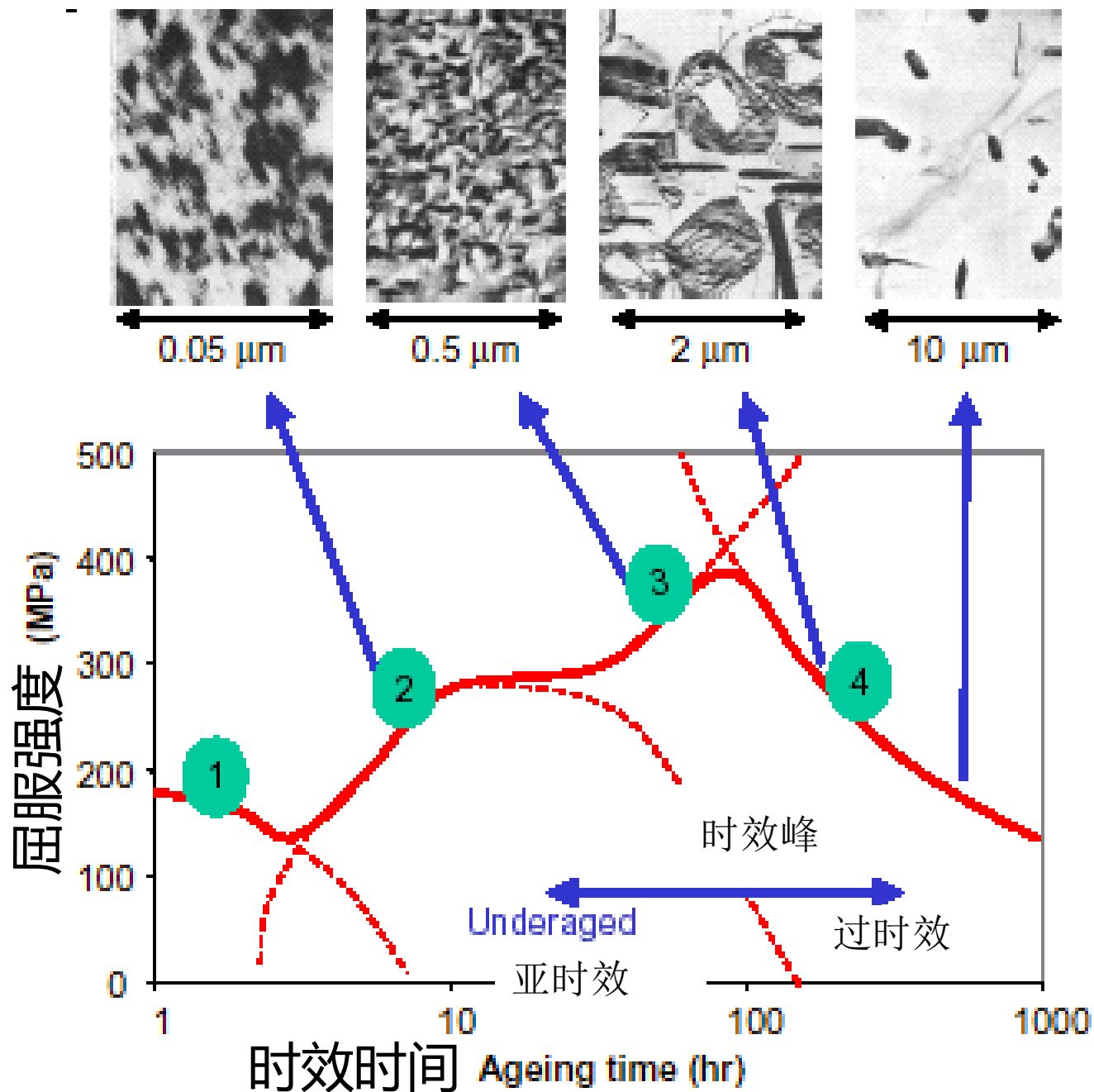


铝合金的热处理强化强化手段

- 铝合金的热处理强化：**固溶处理** + **时效**
 - **固溶处理**是指将合金加热到固溶线以上，保温并淬火后获得过饱和单相固溶体组织
 - **时效**是指将过饱和的固溶体加热到固溶线以下某温度保温，以析出弥散强化相的热处理工艺
- $T_1 \rightarrow T_0 \rightarrow T_1$ 固溶处理
 - $T_1 \rightarrow T_2$ 时效



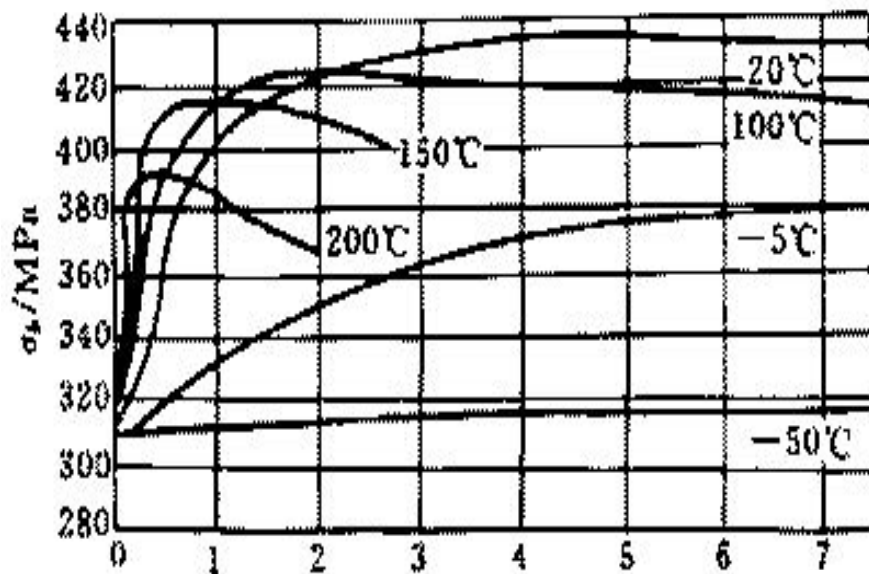
铝合金的固溶时效





铝合金的固溶时效

- 在室温下进行的时效称**自然时效**
- 在加热条件下进行的时效称**人工时效**
- 时效强化效果与加热温度和保温时间有关。温度一定时，随时效时间延长，时效曲线上出现峰值，超过峰值时间，析出相聚集长大，强度下降，为**过时效**



含4%Cu铝合金的时效曲线 时效时间/d



1.3 中国铝合金的牌号、组织与性能

1、变形铝合金

根据国标规定GB/T 16474-2011，变形铝合金可采用中国四位字符牌号，或直接引用国际四位数字体系牌号，如：**2A01**、**3A21**、**5A05**、**7075**

第一位数字为2~9，

2为Al-Cu系

3为Al-Mn系

4为Al-Si系

5为Al-Mg系

6为Al-Mg-Si系

7为Al-Zn-Mg-Cu系

8为Al-Li系

- A表示原始合金，B为原始合金的改型合金...
- 后两位数字为序号



常用变形铝合金

能热处理强化的变形铝合金

- 主要合金系：**
- ① Al-Cu-Mg系合金（**硬铝**）
 - ② Al-Mg-Si-Cu系合金（**锻铝**）
 - ③ Al-Zn-Mg-Cu系合金（**超硬铝**）

① 硬铝：

典型牌号2A12，LY12

- 强度和硬度高，可到400MPa
- 可热处理强化：固溶处理+时效处理
- 包铝：提高其耐蚀能力

用于制造冲压件、模锻件和铆接件，如螺旋桨、梁、铆钉等





常用变形铝合金

② **锻铝**：Al-Mg-Si-Cu系，典型牌号**2A14**和**6061**

特点：具有良好的热塑性，强度也较高。
适于生产各种锻件或模锻件，故称锻造铝合金

③ **超硬铝**：Al-Zn-Mg-Cu系，典型牌号**7075**和**7A04**

特点：强度更高，可达到600MPa，航空结构件
抗蚀性较差，高温下软化快。用包铝法可提高抗蚀性



压气机叶片

锻铝制造的叶片



超硬铝制造飞机前起落架和座椅轨道



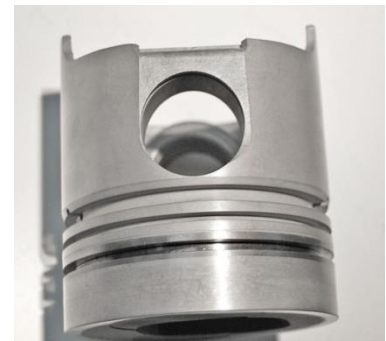


2、铸造铝合金

根据国标规定GB/T 80633-1994，铸造铝合金采用化学元素及数字表示，数字表示该元素的平均含量，最前面加Z。如：**ZAlSi12**等

还可以用代号表示，ZL+三位数字，第一位代表合金类别，后两位是顺序号

- Al-Si系，ZL102、ZL105
- Al-Cu系，ZL201
- Al-Mg系，ZL301
- Al-Zn系，ZL401



ZL109制造的
汽车活塞

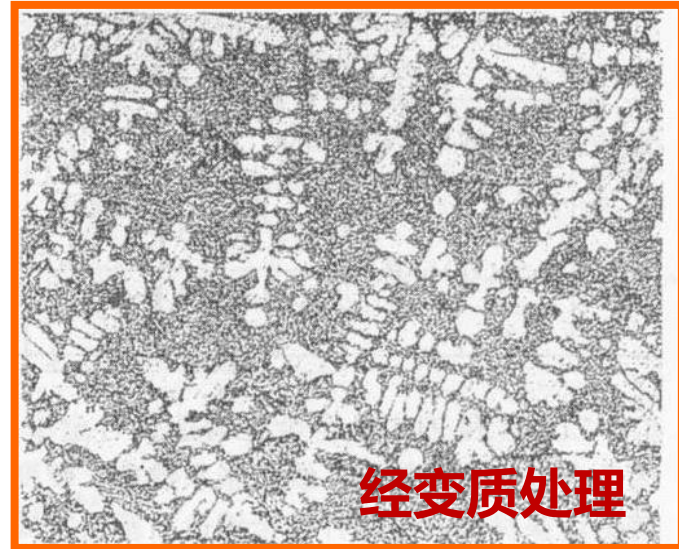
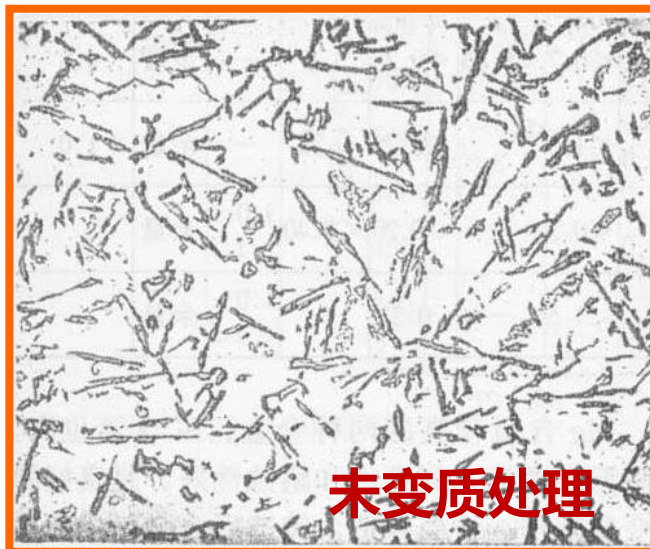
其中Al-Si系是应用最为广泛的铸造铝合金（又称硅铝明）



常用铸造铝合金

其中ZL102是含12%Si的铝硅二元合金，称为**简单硅铝明**

- 在普通铸造条件下，ZL102组织几乎全部为共晶体，由粗针状的硅晶体和 α 固溶体组成，强度和塑性都较差
- 生产上通常用钠盐变质剂进行**变质处理**，得到细小均匀的共晶体加一次 α 固溶体组织，以提高性能



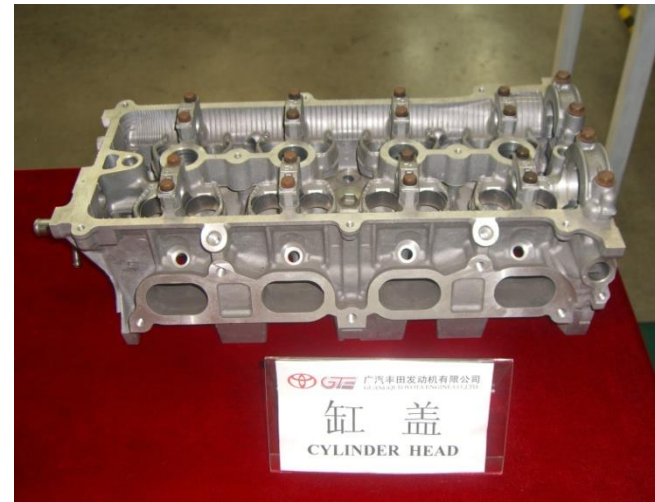


常用铸造铝合金

铸造硅铝合金具有良好的铸造性能，抗蚀性能，力学性能。常用来制造内燃机活塞、汽缸体、风扇叶片等



活塞



铝合金发动机缸体和缸盖



第二节 铜及其合金



2.1 铜

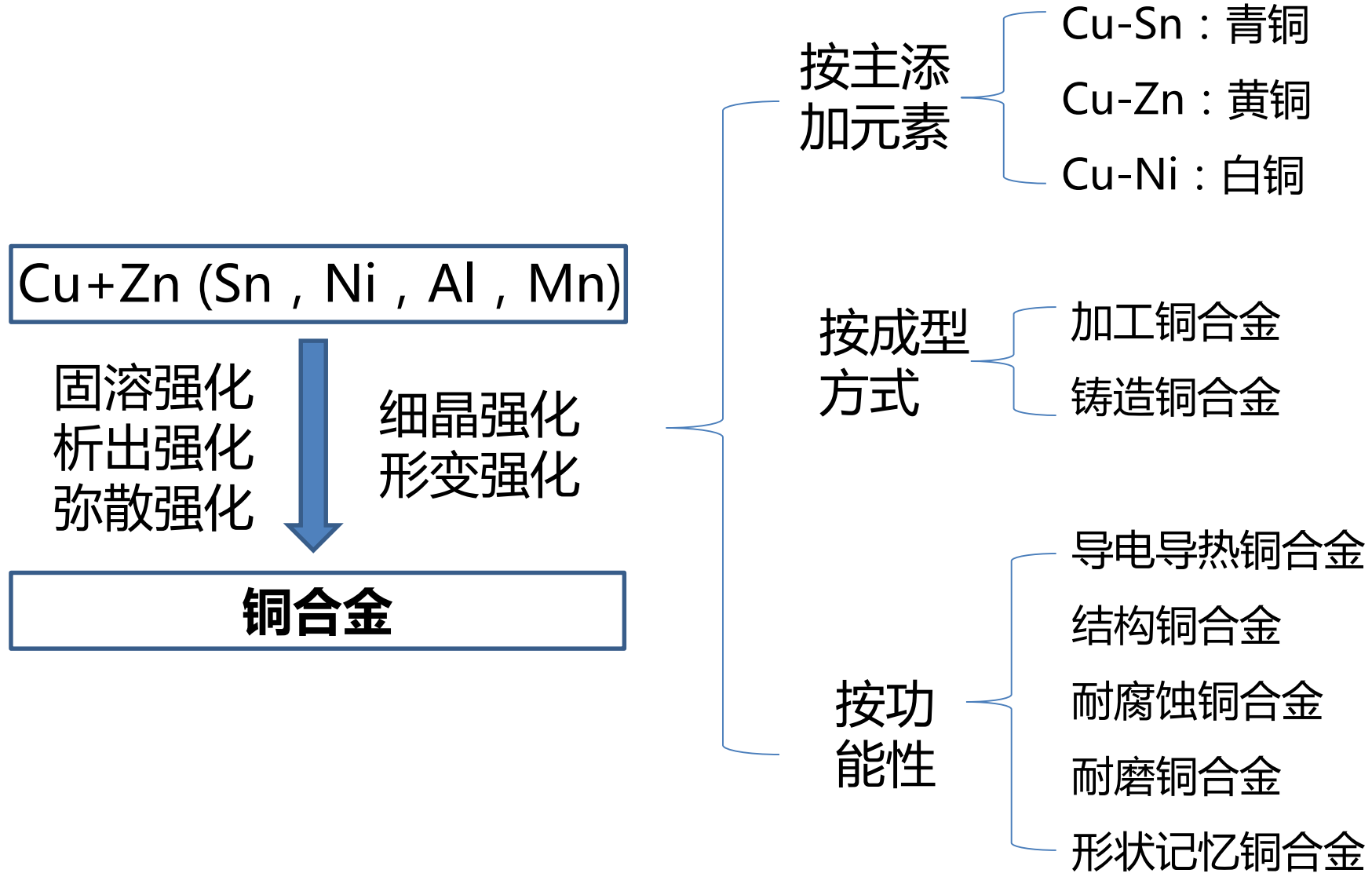
- 纯铜呈紫红色，故又称紫铜
- 熔点 1083.4°C
- 密度($8.92\text{g}/\text{cm}^3$)
- 优异的电导率- $5.9 \times 10^7 \text{ S}/\text{m}$
- 优异的导热性-导热系数： $398 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$
- 在大气、淡水中良好的耐腐蚀性
- FCC 晶体结构: 极好塑性，易加工成型
- 良好的铸造性能和焊接性能
- 非磁性



使用铜及合金的主要原因: **优异的导电性和导热性，良好成型性**



2.2 铜合金的合金化原理及分类





2.3 中国铜合金的牌号、组织与性能

GB/T 29091-2012

分类	牌号组成	示例
纯铜	T+顺序号	如：T1、T3
纯铜（添加其它元素）	T+添加元素化学符号+顺序号或添加元素含量	如：TP2、TAg0.1
无氧铜	TU+顺序号	如：TU1、TU2
普通黄铜（二元）	H+铜含量	如：H90、H65
复杂黄铜（三元）	H+第二主添加元素化学符号+除Zn以外的元素含量（数字间“-”隔开）	如：HPb89-2、HFe58-1-1
青铜	Q+第一主添加元素化学符号+除Cu以外的元素含量（数字间“-”隔开）	如：QAl5、QSn6.5-0.1、QAl10-4-4
普通白铜（二元）	B+镍（钴）含量	如：B5、B30
复杂白铜（三元）	B+第二主添加元素化学符号+除Cu以外的元素含量（数字间“-”隔开）	如：BZn15-20、BAI-6-1



常用铜合金

(1) 黄铜：以锌为主要合金元素的铜合金，分为普通和特殊黄铜

α ：Zn在Cu中的固溶体

β ：电子化合物Cu-Zn为基的固溶体

牌号：

“H” + 数字(表示铜平均百分含量)
如H80，H70，H59

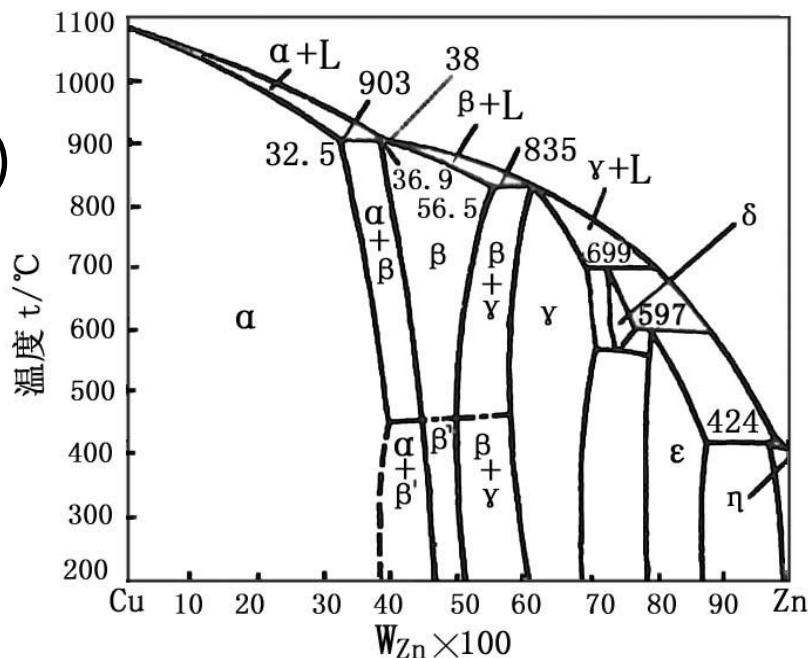


图 9-4 Cu-Zn 合金相图



常用铜合金

单相黄铜 (α) $\text{Zn}\% < 39\%$

- 常见牌号：H80、H68、
H70 (弹壳黄铜)
- 特点：塑性很好，可进行冷、热加工。适于制造冷变形零件，如弹壳、冷凝器管等



双相黄铜 ($\alpha + \beta'$) $39\% < \text{Zn}\% < 45\%$

- 常见牌号：H59、H62
- 特点：热塑性好，强度高，仅适合于热加工。用于制造受力件，如垫圈、弹簧、导管、散热器等



汽车机油泵衬套



常用铜合金

特殊黄铜

对Cu-Zn合金进一步合金化，如添加Al、Fe、Si、Mn、Pb、Ni等元素

特点：具有更高的强度、硬度、抗腐蚀性和良好的铸造性能
HSn90-1表示平均成分为90%Cu、1% Sn，余为锌的锡黄铜





常用铜合金

(2) 青铜：以Sn、Al、Be、Si等为主要合金元素的铜合金

锡青铜：Cu-Sn合金——人类历史上应用最早的合金

无锡青铜：Cu-Al (铝青铜)、Cu-Be (铍青铜)、Cu-Si (硅青铜)等，又称为特殊青铜

QSn4 - 3：4%Sn、3%Zn，其余为Cu

QAl9 - 4：9%Al、4%Fe，其余为Cu

QBe1.9：1.9%Be，其余为Cu

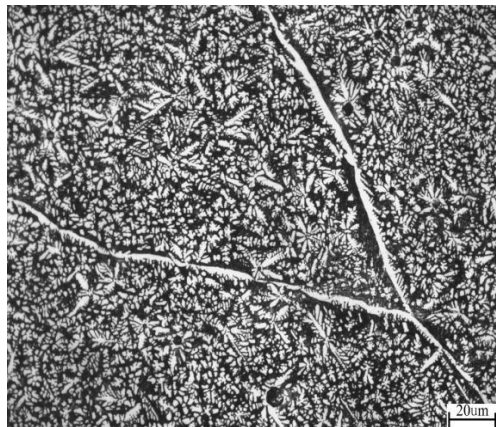




常用铜合金

锡青铜：以锡为主加元素的铜合金，锡含量一般为3~14%

- 凝固范围大、铸造流动性差，铸件密度低，易渗漏，但体积收缩率在有色金属中最小、热裂倾向低
- 耐蚀性良好，在大气、海水及无机盐溶液中的耐蚀性比纯铜和黄铜好，但在硫酸、盐酸和氨水中的耐蚀性较差
- 主要用于耐蚀承载件，如弹簧、轴承、齿轮轴、蜗轮、垫圈等。
- 常见牌号：QSn6.5-0.1，QSn7-0.2





常用铜合金

铝青铜：以铝为主加元素的铜合金，铝含量为5~11%

- 强度、硬度、耐磨性、耐热性及耐蚀性高于黄铜和锡青铜，铸造性能好，但焊接性能差
- 用于制造船舶、飞机及仪器中的高强、耐磨、耐蚀件，如齿轮、轴承、蜗轮、轴套、螺旋桨等



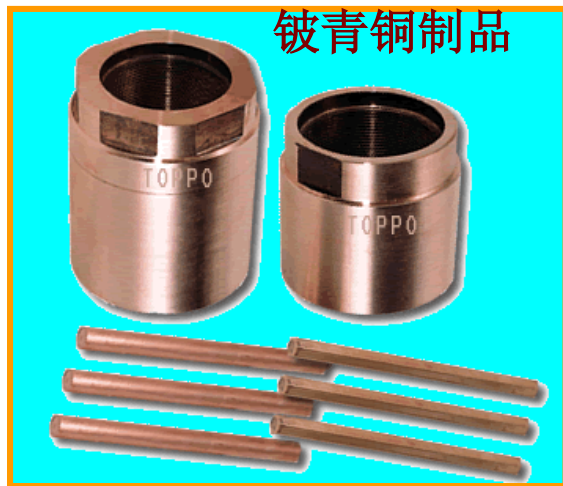
大型水力发电设备中的抗磨环



常用铜合金

铍青铜：以铍为主加元素的铜合金，铍含量为1.7~2.5%
具有高的强度、弹性极限、耐磨性、耐蚀性，良好的导电性、导热性、冷热加工及铸造性能，但价格较贵。

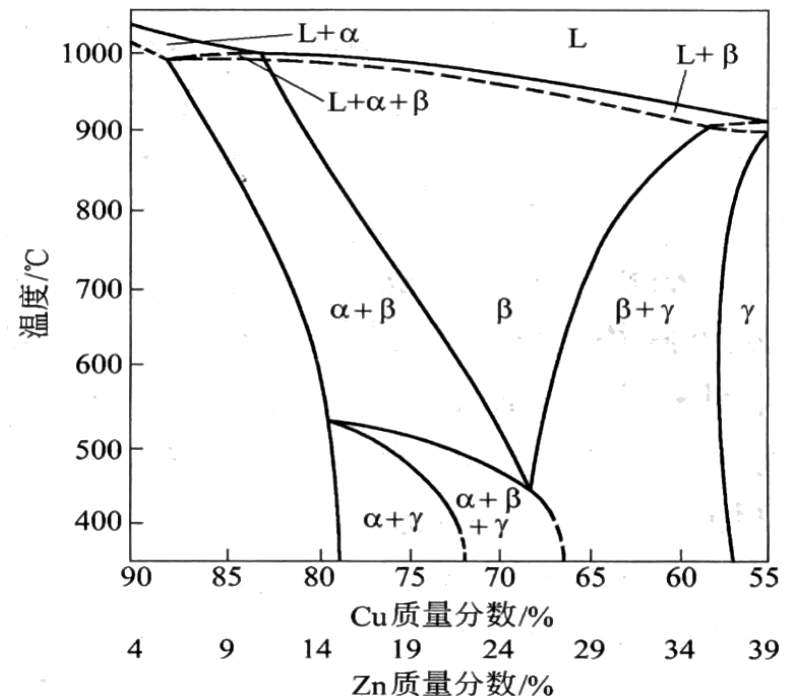
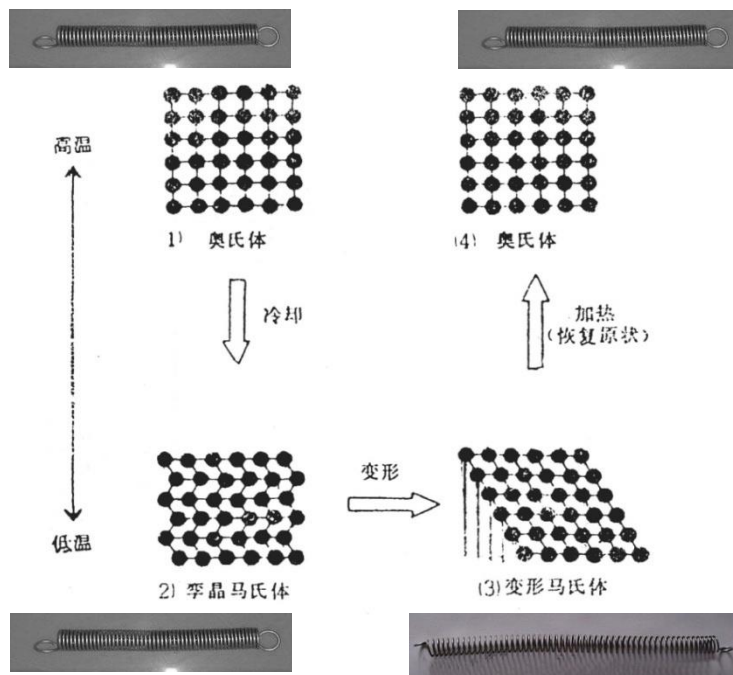
用于重要的弹性件、耐磨件，如精密弹簧、膜片，高速、高压轴承及防爆工具、航海罗盘等重要机件



新型铜合金 - 铜基形状记忆合金

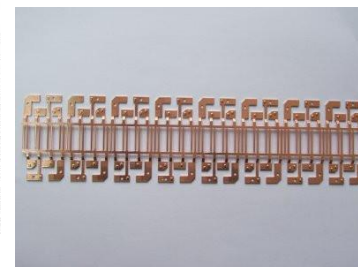
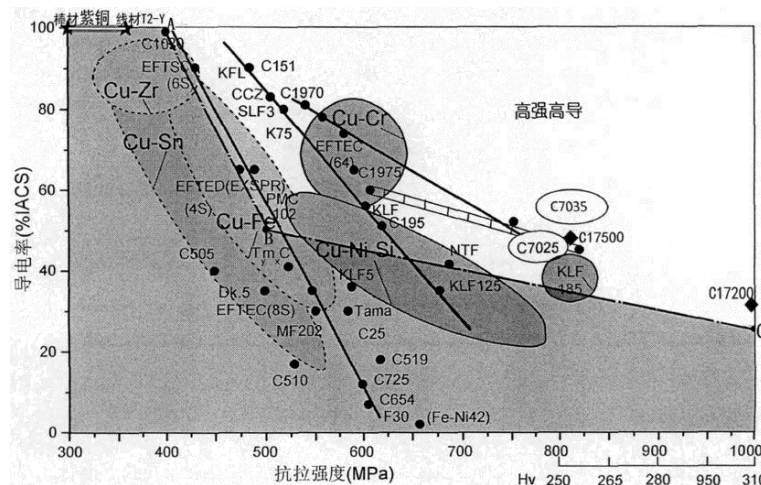
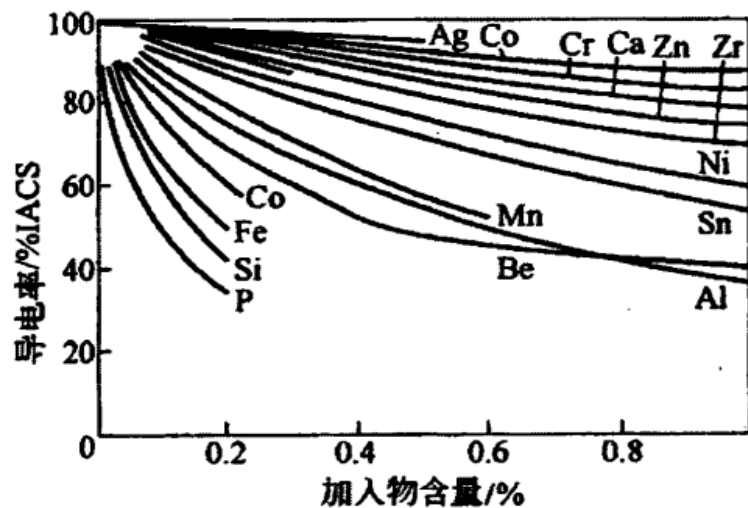
在一定温度下因外力作用发生变形，当外力去除后，加热到一定温度（ A_f ，马氏体逆相变结束温度），又能恢复原来形状。包括Cu-Zn和Cu-Al基

最广泛使用的是：**Cu-Zn-Al**和**Cu-Al-Ni**合金



新型铜合金 - 高强高导铜合金

在紫铜的基础上添加适量的Fe、P、Ni、Si和Zr等元素而形成的合金，保持铜高导电的同时，具有高强度。固溶、细晶、弥散等强化手段





第三节 镁及其合金



3.1 镁

- 熔点 650°C
- 密度小($1.736\text{g}/\text{cm}^3$)-铝的 $2/3$ ，钢的 $1/4$ ，比强度、比刚度高
- 阻尼性能好，切屑加工性能优良，电磁屏蔽性能好
- 化学活性极强，极易氧化，耐腐蚀差
- 强度低
- HCP 晶体结构: 室温塑性差

纯镁：不用作结构材料，主要用作镁合金原料和脱氧剂



3.2 镁合金的合金化原理及分类

$\text{Mg} + \text{Al}(\text{Mn}, \text{Zn}, \text{Zr}, \text{Re})$

固溶强化
析出强化
弥散强化



细晶强化
形变强化

镁合金

变形镁合金和铸造镁合金两大类





3.3 常用镁合金

(1) 变形镁合金的牌号：主要合金组成元素的代号+这些元素的大致含量（数字）+表示代号（英文字母），如AZ61M

(2) 铸造镁合金的牌号：字母Z（铸的拼音首字母）+Mg+合金元素符号+平均百分含量+（合金元素符号+平均百分含量...），如ZMgZn5Zr

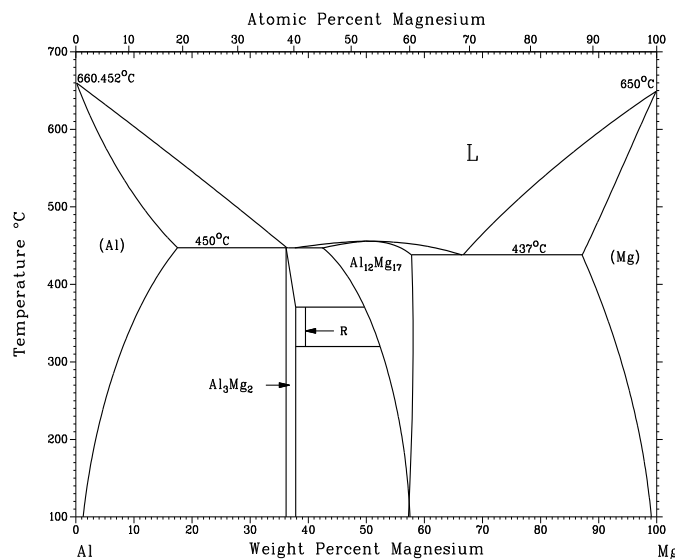
元素代号	元素名称	元素代号	元素名称
A	铝	M	锰
B	铍	N	镍
C	铜	P	铅
D	镉	Q	银
E	稀土	R	铬
F	铁	S	硅
G	钙	T	锡
H	钛	W	钨
K	锆	Y	铈
L	锂	Z	锌



3.3 常用镁合金

铸造镁合金：Mg-Al系（**不含Zr**）和Mg-Zn-Zr、Mg-Re-Zn-Zr系

- **Mg-Al系**：Mg-Al、Mg-Al-Zn、Mg-Al-Mn、Mg-Al-Si和Mg-Al-Re，目前应用最广泛、种类最多
- Mg-Al-Mn，如ZMgAl8Zn(AZ91C)，耐腐蚀性能提高；用于机翼肋、支臂和支座等
- Mg-Al-Re,如AE41和AE42，添加1%混合稀土明显**提高高温抗蠕变性能**，用于航空航天





3.3 常用镁合金

变形镁合金：Mg-Al-Mn系和Mg-Zn-Zr系、Mg-Mn系，比铸造镁合金具有更好延展性和良好综合力学性，**需在较高温**度下（300-500℃）进行热加工

- **Mg-Al-Mn系**：中等强度、塑性较好。如AZ31、AZ61M、AZ80M等
- **Mg-Mn系**：不能通过热处理强化，但可通过加工硬化得到强化，**Mn添加目的是提高耐腐蚀性**。如M1A和M2M
- **Mg-Zn-Zr系**：如ZK21、ZK60等，ZK60合金经过时效后，其室温强度是常规商用变形镁合金中最高的



第四节 钛及其合金



4.1 钛

- 熔点 1650°C
- **密度低** ($4.5\text{g}/\text{cm}^3$)
- 优良的耐腐蚀性和生物相容性
- 无磁性
- 电导率 ($2.4 \times 10^6 \text{ S}/\text{m}$)
- 热传导性较低 ($15.24\text{W} / \text{m}\cdot\text{K}$)
Cu的1/7
- 两种同素异构体，即 α -Ti (室温) 和 β -Ti
- 高纯Ti具有良好塑性，但杂质含量高时硬而脆
- 低温性能优异



纯钛：很好结构材料和功能材料，“全能金属”，
广泛应用与航空航天、交通、医疗等领域



4.2 钛合金的合金化原理及分类

Ti合金主要有密排六方的**室温 α 相**和体心立方**高温 β 相**两种相结构

- 1) **α 稳定元素**：能提高 α/β 转变温度的元素，
包括**Al**、O、N、C、Ga和Ge等
- 2) **β 稳定元素**：能降低 α/β 转变温度的元素，
包括V、Mo、**Nb**、**Ta**、Mn、Fe、Cr、Si、Cu等
- 3) **中性元素**：对 α/β 转变温度影响不大的元素，
如Zr、Hf、Sn、Ce、Mg等

钛合金中主要强化途径：**固溶强化和弥散强化**



4.3 常用钛合金的牌号，组织及性能

(1) 工业纯钛的牌号：

TA (α 型钛合金) + 顺序号，序号越大，纯度越低，
如TA0、TA1、TA2和TA3

(2) 钛合金的牌号：

T + 大写字母A，B和C (A代表 α 钛合金，B代表 β 钛合金，C代表 $\alpha + \beta$ 钛合金) + 数字 (顺序号)

如TC4，其成分为Ti-6Al-4V

牌号TA6，代表成分为Ti-5Al-2.5Sn的 α 钛合金



4.3 常用钛合金的牌号，组织及性能

α 钛合金：以 α -Ti为基体的单相固溶体合金，合金化元素以 α 稳定元素或中性元素为主，包括Al，Sn，Zr等

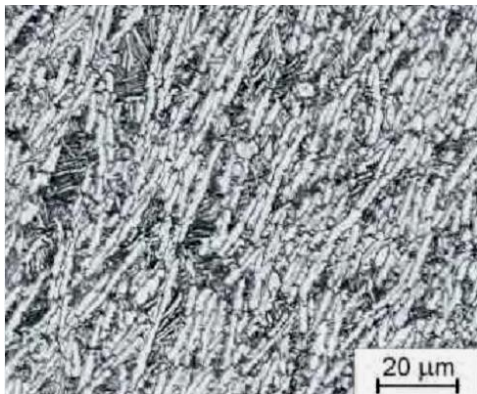
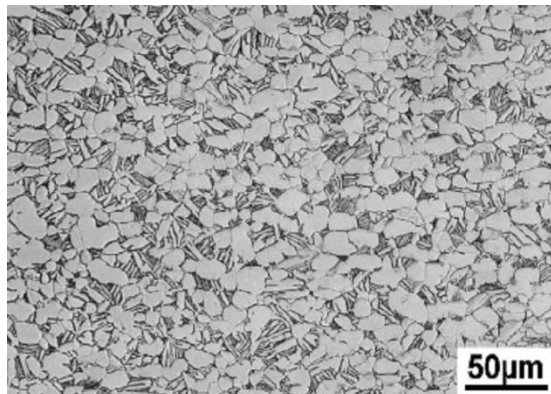
- ◆ 具有优异的高温性能和焊接加工性能，但在常温下强度较低，塑性不好。
- ◆ 主要用在高温环境下，是耐热高温钛合金的主要合金种类，典型牌号为TA4~TA8



4.3 常用钛合金的牌号，组织及性能

$\alpha+\beta$ 钛合金：室温以 $\alpha+\beta$ 相为基体的合金

- ◆ 工业用的 $\alpha+\beta$ 钛合金多以 α 相为主相，可以通过热处理强化
- ◆ 具有较好的综合力学性能，且在常温 and 中等温度下的强度较高，焊接性能和热加工性能也较好，**典型牌号为TC4**
- ◆ 主要用来制造飞机压气机叶片、耐压壳体和低温高压容器





4.3 常用钛合金的牌号，组织及性能

β 钛合金：

室温以 β -Ti相为基体，添加的 β 稳定元素含量超过17%

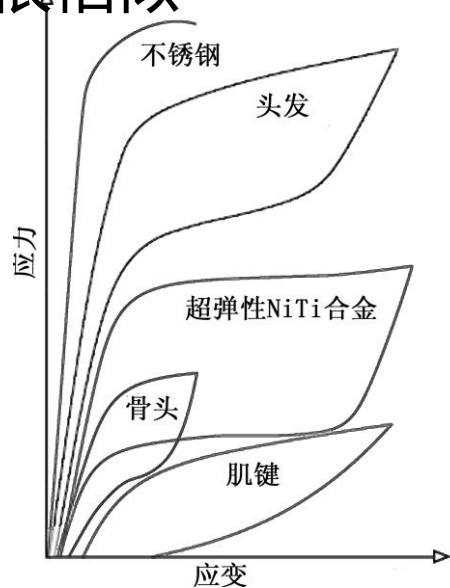
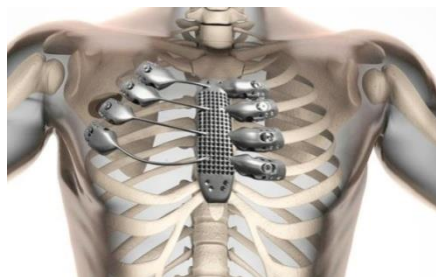
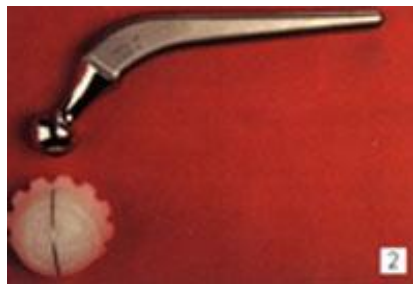
- ◆ 塑性加工性能是三类合金中最好的，弹性模量也是三类合金中最小
- ◆ 高温的微观组织不够稳定，工作温度不能超过300℃，典型牌号为TB1和TB2

4.3 常用钛合金的牌号，组织及性能

医用超弹性 β 钛合金：

添加Mo、Nb、Ta、Zr、Sn等无毒害元素的 β 稳定元素，包括Ti-Nb和Ti-Mo系

- ◆ 具有十分优良的生物医学性能、耐腐蚀性
- ◆ 独特的超弹性与人体骨头等组织的力学行为很相似





第五节 轴承合金



5.1 轴承合金的分类

工作条件：支撑轴高速旋转，强烈摩擦，承受周期性载荷

性能要求： ① 良好的减摩性： 摩擦系数↓，磨合性能↑

② 足够的力学性能： 抗压强度、 疲劳强度↑

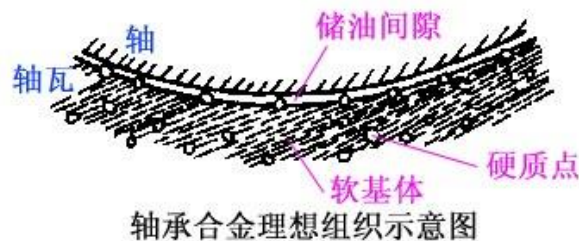
组织要求：

① 软基体 + 硬质点

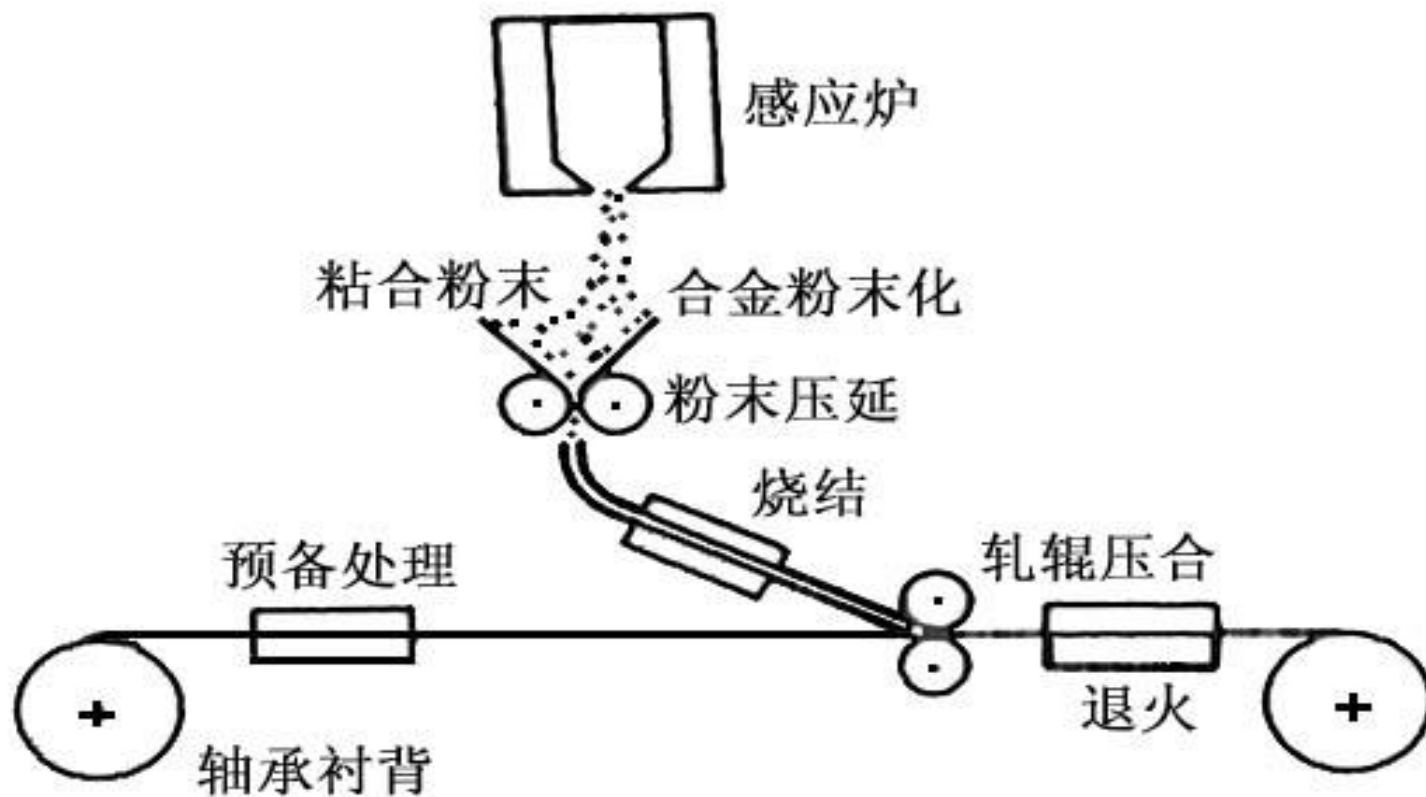
锡基和铅基轴承合金(巴氏合金)

② 硬基体 + 软质点

铜基和铝基轴承合金、灰铸铁



轴承合金的制造工艺





5.2 常用轴承合金

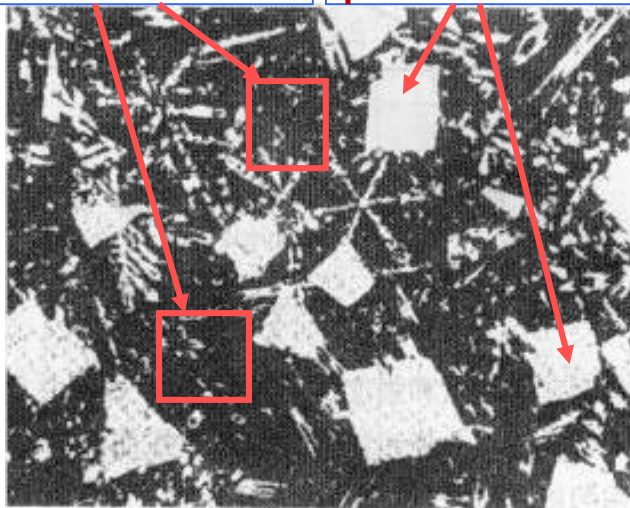
轴承合金牌号：Z（铸造）+基体元素符号(Sn、Pb、Cu、Al等)+添加元素以及平均百分含量+…，如牌号ZSnSb11Cu6代表铸造锡基轴承合金。

(1) 锡基轴承合金（巴氏合金）

减摩性↑、抗腐蚀性↑
疲劳强度↓、工作温度↓
价格昂贵(Sn短缺)



α 固溶体(HB30) β 固溶体(HB110)



ZSnSb11Cu6轴承合金的显微组织

用途：广泛用于重型动力机械，如气轮机、涡轮机和内燃机等大型机器高速轴瓦



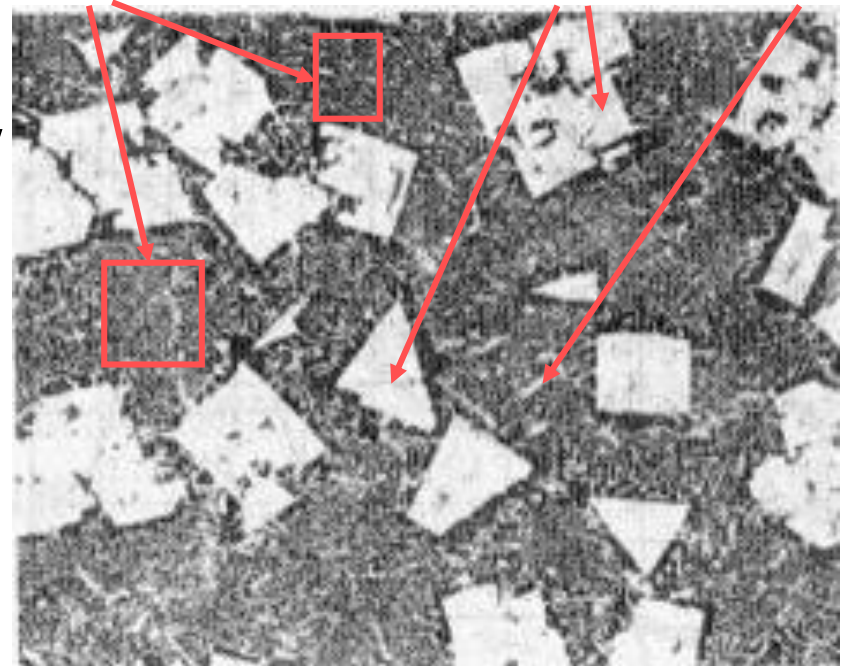
5.2 常用轴承合金

(2) 铅基轴承合金

强度、硬度等都不如锡基轴承合金，且摩擦系数较大，但其成本低，高温强度好，有自润滑性

$(\alpha + \beta)$ 共晶体(HB8)

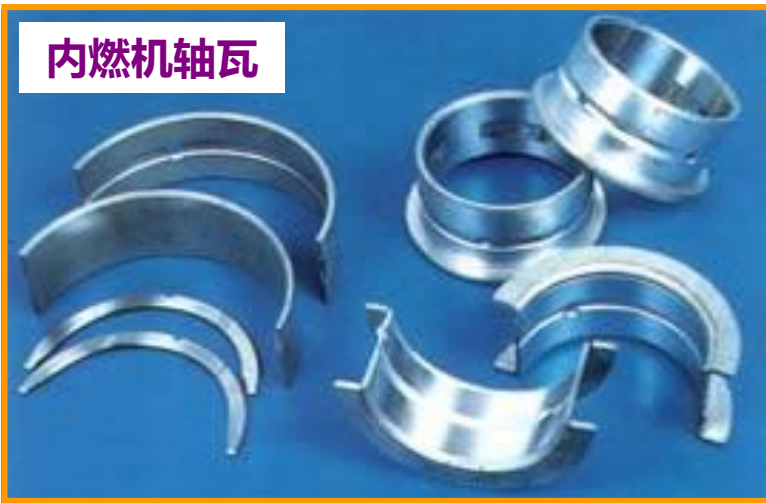
β 相(HB30)及 Cu_2Sb



ZHPbSb16-16-2轴承合金的显微组织

用途：常用于低速、低载条件下工作的设备,如汽车、拖拉机曲轴的轴承等

内燃机轴瓦





5.2 常用轴承合金

(3) 铜基轴承合金

- ZQSn10-1 (锡青铜) : 10%Sn、1%Pb

特点：强度高，适于高速、重载荷的柴油机轴承。可以直接做成轴承，无需“挂衬”

- ZQPb30 (铅青铜) : 30%Pb

特点：疲劳强度高，摩擦系数低，工作温度高，适于高负荷、高速重要轴承，需“挂衬”



5.2 常用轴承合金

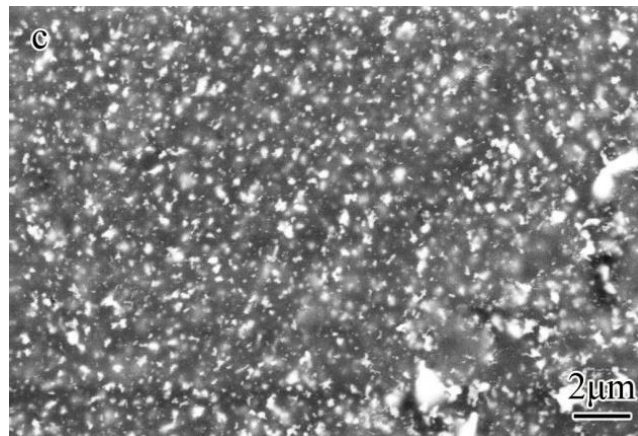
(4) 铝基轴承合金（硬基体 + 软质点）

新型减摩材料，密度小，导热性好，疲劳强度高且价格低廉。将逐渐代替锡基、铅基和铜基轴承合金，因而可大量节约工业用铜

Al-Sn 轴承合金：Al-20%Sn-1%Cu

特点：疲劳强度↑，耐磨性、耐热性、耐蚀性↑

适于高速、重载的发动机轴承（如拖拉机的柴油机轴承）



Al-20%Sn退火1小时后的SEM形貌像



本章小结

铝及合金

Cu
Mg
Mn
Si
Zn

铜及合金

紫铜
黄铜
青铜
新型铜合金

镁及合金

Al
Zn
Re

钛及合金

α -Ti
 β -Ti
 $(\alpha+\beta)$ -Ti

轴承合金

铅基
锡基
铜基
铝基

了解各类有色金属的常见牌号、合金化机理、组织特征与典型应用