

# 第三章 金属材料

3.1 碳钢

3.2 合金钢

3.3 铸钢与铸铁

3.4 有色金属及其合金



黑色金属

## **3.4 有色金属及其合金**

**3.4.1 铝及铝合金**

**3.4.2 铜及铜合金**

**3.4.3 钛及钛合金**

**3.4.4 轴承合金**

## 3.4.1 铝及铝合金

### 特性：

- (1) 密度小 ( $2.7\text{g/cm}^3$ )、比强度高
- (2) 有优良的物理、化学性能

导电性好，抗大气腐蚀能力好( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )，磁化率极低，良好的低温性能(纯铝- $235^\circ\text{C}$ 塑性和冲击韧度也不降低)

- (3) 加工性能良好

铝(FCC,  $\delta=30\sim50\%$ ,  $\psi=80\%$ )及铝合金(退火状态)的塑性很好，可以冷成型。切削性能也很好。

超高强铝合金成型后经热处理，可达到很高的强度。铸造铝合金的铸造性能极好。

# 一、纯铝

## ◆分类:

- 高纯铝：L05~L01，数字越小，纯度越低
- 工业高纯铝：L0，L00，“0”个数增加，纯度降低(LG5~LG1)
- 工业纯铝：L1~L7，数字越大，纯度越低

## ◆用途:

- 高纯铝主要用于科学研究及制作电容器；
- 工业高纯铝的主要用途是配制铝合金；
- 工业纯铝还可用来制造导线、包覆材料、耐蚀和生活器皿等。

## 二、铝合金

- ◆ 铝合金既具有高强度又保持纯铝的优良特性
- ◆ 铝合金常加入的元素主要有Cu、Mn、Si、Mg、Zn等



美F-117隐身战斗机  
(所用材料大部分是铝合金)



# 1、铝合金的分类及强化机制

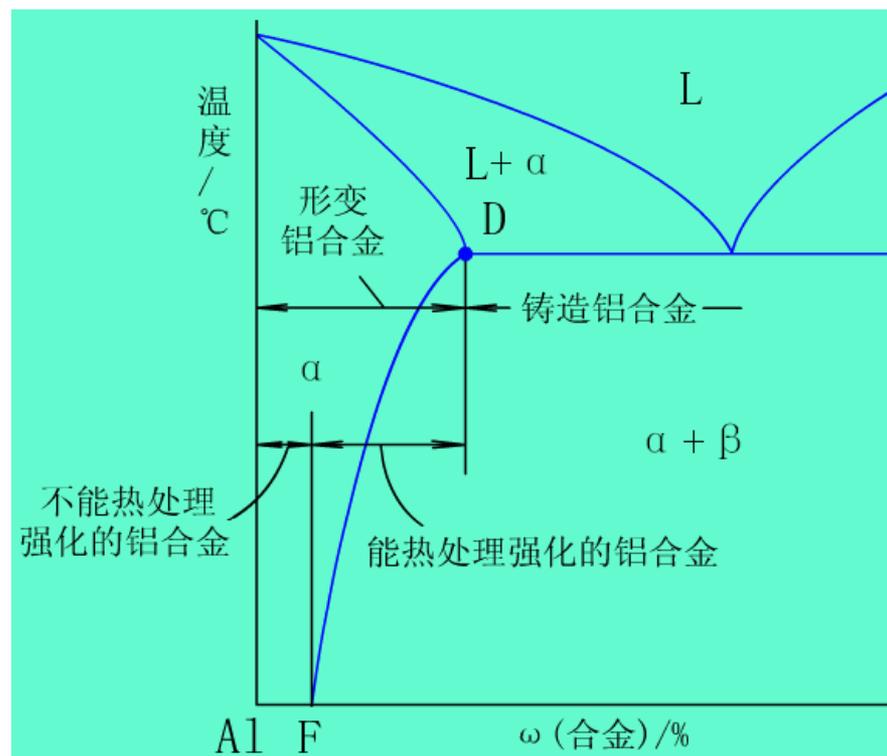
## 1) 铝合金的分类

✓ **变形铝合金**：D点以左，加热时能形成单相固溶体组织，塑性好，适于变形加工

✓ **Al-F不可热处理强化**

✓ **F-D可热处理强化**

✓ **铸造铝合金**：D点以右，由于冷却时有共晶反应发生，流动性较好，适于铸造生产



## 2) 铝合金的强化机制

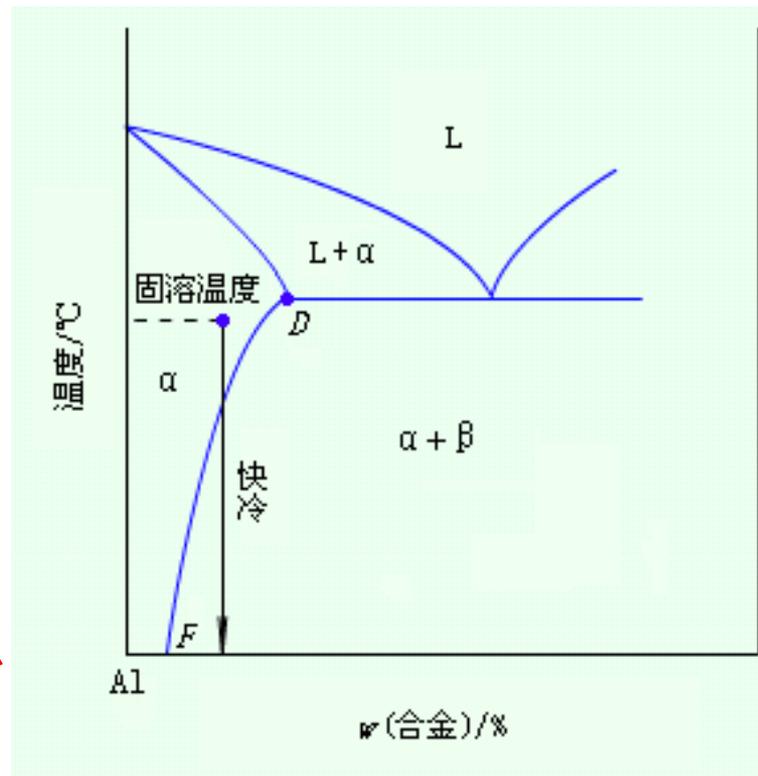
### (1) 固溶处理

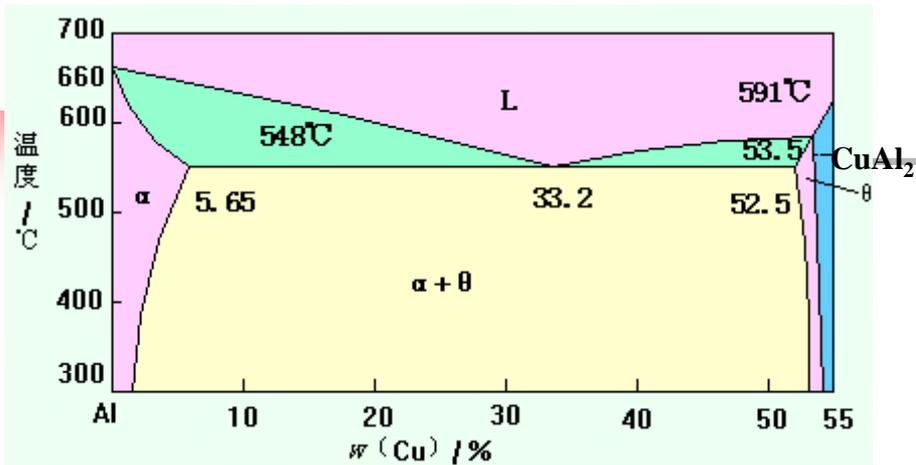
将成分位于相图中D~F之间的合金加热到固溶线以上，保温获得单相 $\alpha$ 后迅速水冷，得到过饱和的 $\alpha$ 固溶体

### (2) 时效强化（第二相强化）

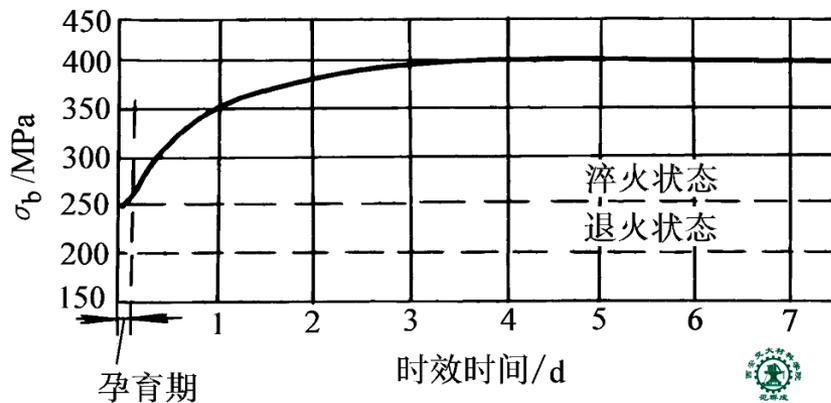
●在室温下放置或低温加热时，强度和硬度会明显升高。这种现象称为时效或时效硬化。

**时效的条件：**合金能在高温形成均匀的固溶体，并且固溶体中溶质的溶解度必须随温度的降低而显著降低。





Al-Cu合金相图



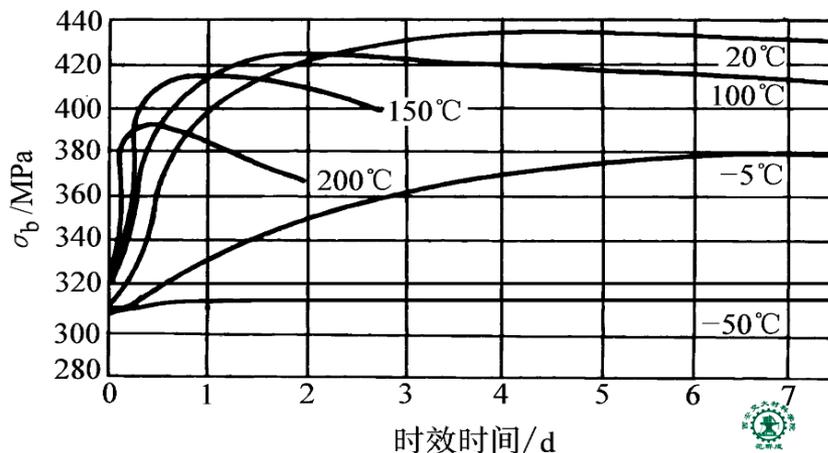
含4%Cu的Al-Cu合金的自然时效曲线

## ■ 时效规律

① 时效温度越高，强度峰值越低，强化效果越小；

② 时效温度越高，时效速度越快，强度峰值出现所需时间越短；

③ 低温使固溶处理获得的过饱和固溶体保持相对的稳定性，抑制时效的进行。

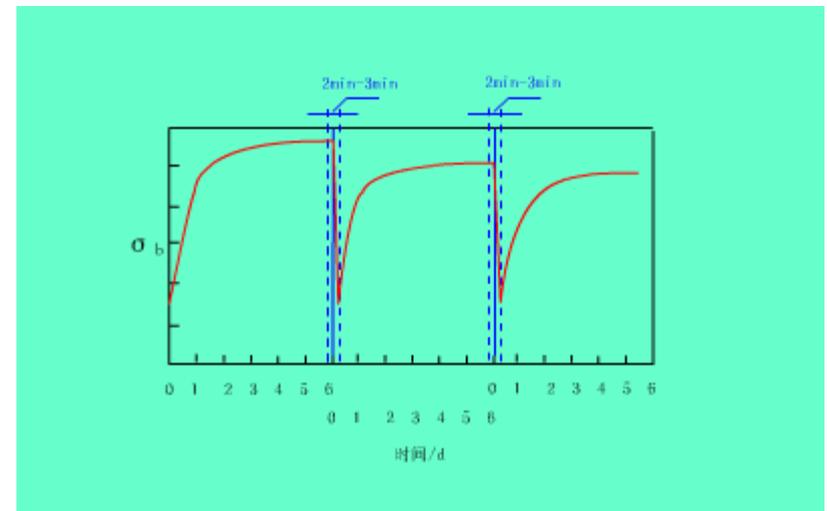


含4%Cu的Al-Cu合金不同温度下的时效曲线

# 回归

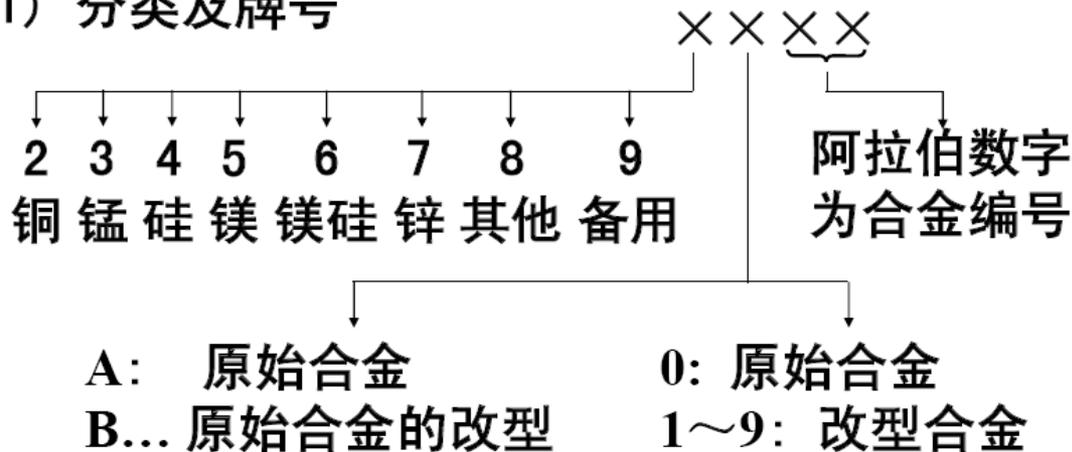
自然时效后的铝合金，在230 °C~250 °C短时间(几秒至几分钟)加热后，快速水冷至室温时，可以重新变软。如再在室温下放置，则又能发生正常的自然时效。这种现象称为回归。

- 一切能时效硬化的合金都有回归现象。
- 自然时效后的铝合金在反复回归处理和再时效时强度有所降低。
- 时效后的铝合金可在回归处理后的软化状态进行各种冷变形。利用这种现象，可随时进行飞机的铆接和修理等。



## 2、变形铝合金

### 1) 分类及牌号



如： 2A01    5A05    5B05    7075    7475

GB 3190-82中的旧牌号仍可继续使用，表示方法为：

防锈铝合金： LF+序号

硬铝合金： LY +序号

超硬铝合金： LC +序号

锻铝合金： LD+序号

环宇金属科技，品牌诚待天下！

[www.huny.cn](http://www.huny.cn)

# (1) 防锈铝合金



- **Al-Mn系 和Al-Mg系合金**
- **Mg**: 固溶强化, 降低密度, 抗腐蚀
- **Mn**: 固溶强化, 抗腐蚀
- 高的塑性, 低中等强度, 优良的抗腐蚀及焊接性能
- 不能进行热处理强化, 退火/冷作硬化态使用。
- **LF21 ( 3A21 ) (Al-Mn合金)**用于焊接件、容器、管道, 或需用深延伸、弯曲等方法制造的低载荷零件、制品以及铆钉等。
- **LF5 ( 5A05 ) (Al-Mg合金)**用于焊接**容器**、管道, 以及承受中等载荷的零件及制品, 也可用作铆钉。

## (2) 硬铝合金 (Al-Cu-Mg系)



- 可时效强化，亦可形变强化
  - Cu、Mg强化相，Mn耐蚀性
  - 强度、硬度高，加工性能好，耐蚀性低于防锈铝。
- ① **低合金硬铝 2A01 (LY1)**：Mg、Cu含量较低，塑性好，强度低。时效强化。常称铆钉硬铝。
  - ② **标准硬铝 2A11 (LY11)**：合金元素中等，强度和塑性中等。退火后变形加工性能良好，时效后切削加工性能也较好。主要用于轧材、锻材、冲压件和螺旋桨叶片及大型铆钉等重要零件。
  - ③ **高合金硬铝 2A12 (LY12)**：合金元素较多，强度和硬度较高，塑性及变形加工性能较差。用于制作航空模锻件和重要的销、轴等零件。

### (3) 超硬铝合金 (Al-Mg-Zn-Cu系)

- 牌号有**7A04(LC4)**、**7A09(LC9)**等。
- 固溶处理和人工时效
- **强度最高的铝合金**。抗蚀性较差，高温下软化快。用包铝法可提高抗蚀性。
- 超硬铝合金多用于制造受力大的重要构件，例如飞机大梁、起落架等。

飞机前起落架



飞机用座椅轨道及航空零件

## (4) 锻铝合金（Al-Mg-Si-Cu或Al-Cu-Mg-Ni-Fe系）

- 牌号**2A50(LD5)**、**2A70(LD7)**、**2A14(LD10)**
- 合金的元素种类多但用量少，有良好的热塑性、铸造性能和锻造性能，并有较高的机械性能。
- **固溶处理和人工时效。**
- 这类合金主要用于承受重载荷的锻件和模锻件

# 变形铝合金的主要牌号、成分、机械性能及用途

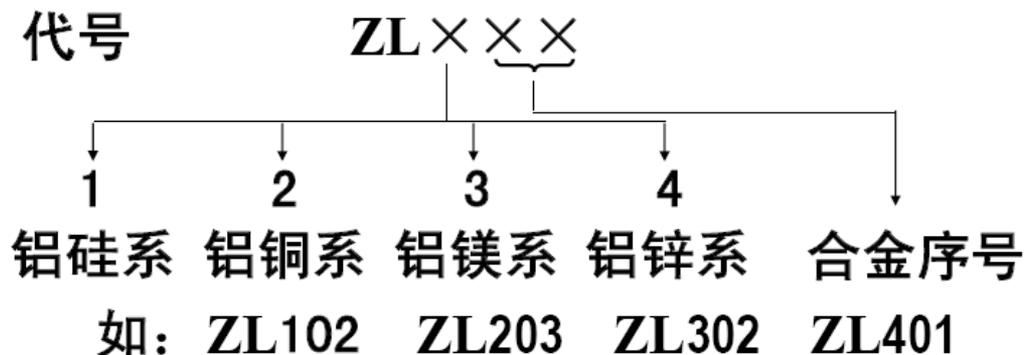
类别	代号	化学成分 w/%						热处理状态	机械性能			用途
		Cu	Mg	Mn	Zn	其它	Al		$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%	H B	
防锈铝合金	5A05 (LF5)		4.8~ 5.5	0.3~ 0.6			余量	退火	270	23	70	中载零件、铆钉、焊接油箱、油管
	3A21 (LF21)		0.05	1.0~ 1.6			余量		130	23	30	管道、容器、铆钉及轻载零件及制品
硬铝合金	2A01 (LY1)	2.2~ 3.0	0.2~ 0.5				余量	固溶处理+自然时效	300	24	70	中等强度、工作温度不超过100℃的铆钉
	2A11 (LY11)	3.8~ 4.8	0.4~ 0.8	0.4~ 0.8			余量		420	18	10 0	中等强度构件和零件,如骨架、螺旋桨叶片、铆钉
	2A12 (LY12)	3.8~ 4.9	1.2~ 1.8	0.3~ 0.9			余量		480	11	13 1	高强度的构件及150℃以下工作的零件,如骨架、梁、铆钉
超硬铝合金	7A04 (LC4)	1.4~ 2.0	1.8~ 2.8	0.2~ 0.6	5.0~ 7.0	Cr0.1~0.25	余量	固溶处理+人工时效	600	12	15 0	主要受力构件及高载荷零件,如飞机大梁,加强框、起落架
	7A09 (LC9)	1.2~ 2.0	2.0~ 3.0	0.15	5.1~ 6.1	Cr0.16~0.30	余量					同上
锻铝合金	2A50 (LD5)	1.8~ 2.6	0.4~ 0.8	0.4~ 0.8		Si0.7~1.2	余量	固溶处理+人工时效	420	13	10 5	形状复杂和中等强度的锻件及模锻件
	2A70 (LD7)	1.9~ 2.5	1.4~ 1.8	0.2	0.3	Ti0.02~0.1 Ni0.9~1.5 Fe0.9~1.5 Si0.35	余量		440	13	12 0	高温下工作的复杂锻件和结构件、内燃机活塞
	2A14 (LD10)	3.9~ 4.8	0.4~ 0.8	0.4~ 1.0		Si0.5~1.2	余量		480	10	13 5	高载荷锻件和模锻

环宇金属科技, 品牌诚待天下!

www.huny.cn

## 3、铸造铝合金

### 1) 分类及牌号



### 2) 性能特点

- 良好的铸造性能
- 力学性能不如变形铝合金
- 成本较低

3) 应用：适合于形状复杂的零构件、箱体、壳体、活塞等



铝合金发动机缸体和缸盖

# Al-Si 铸造铝合金（硅铝明）

—— 铸造性好（熔点低、流动性好、收缩小）

变质处理 —— 显著提高力学性能。

组织 —— 变质前，共晶体（粗针状Si +  $\alpha$  基体）+ 初晶Si

变质后，共晶体（细点状Si +  $\alpha$  基体）+ 初晶 $\alpha$



变质处理后， $\times 100$



ZL102的铸态组织，未变质， $\times 500$

## 3.4.2 铜及铜合金

铜及铜合金有下列特性：

### (1) 优异的物理、化学性能

导电性、导热性极佳；对大气和水的抗蚀能力很高；铜是抗磁性物质。

### (2) 良好的加工性能

塑性加工性能优良，容易冷、热成型；切削加工性能优良，铸造铜合金有很好的铸造性能；焊接性好。

### (3) 某些特殊机械性

例如优良的减摩性和耐磨性(如青铜及部分黄铜)，抗卡咬，高的弹性极限和疲劳极限(如铍青铜等)，弹性稳定。

### (4) 色泽美观

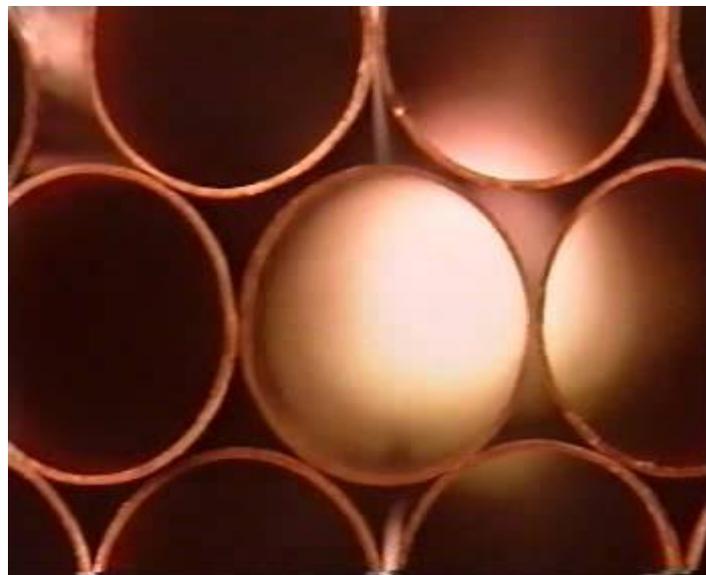
# 一、纯铜（紫铜）

**FCC**，无同素异构体，

牌号T1~T4，编号越大，纯度越低。

纯铜主要用于制作电导体及配制合金。纯铜的强度低，不宜作结构材料。

纯铜管



## 二、铜合金

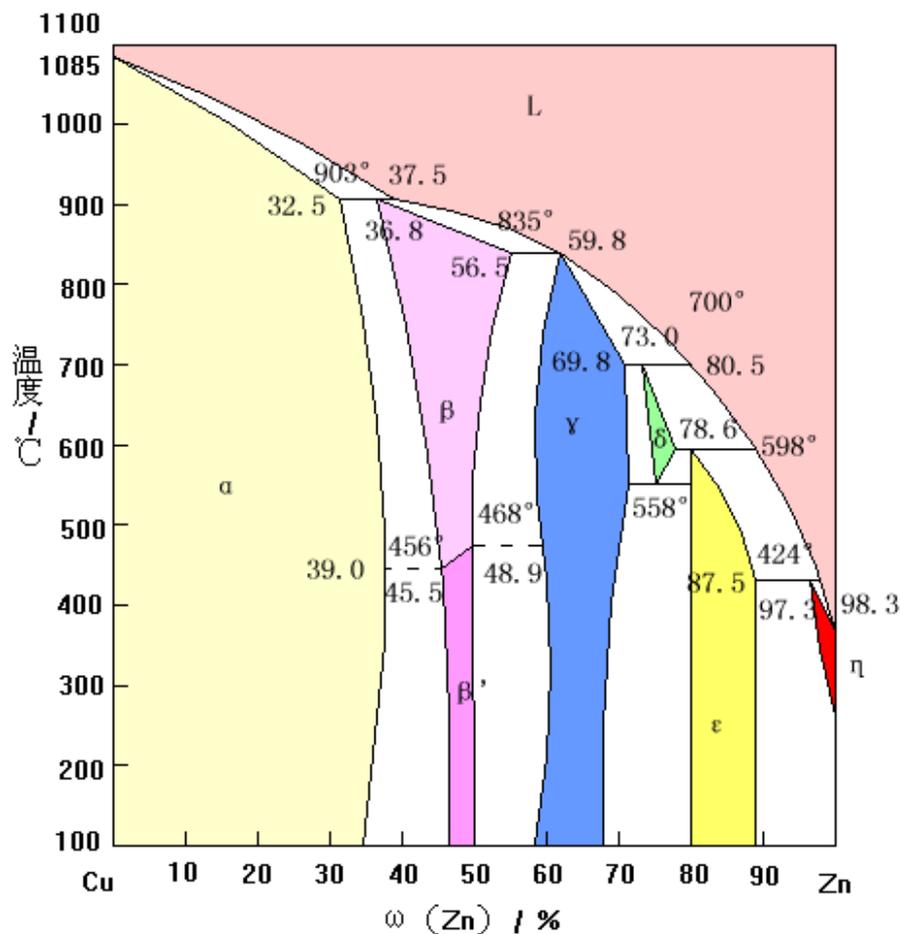
- 铜+合金元素→铜合金
- 黄铜、青铜和白铜

### (1) 黄铜——Cu-Zn系合金

#### ① 普通黄铜:

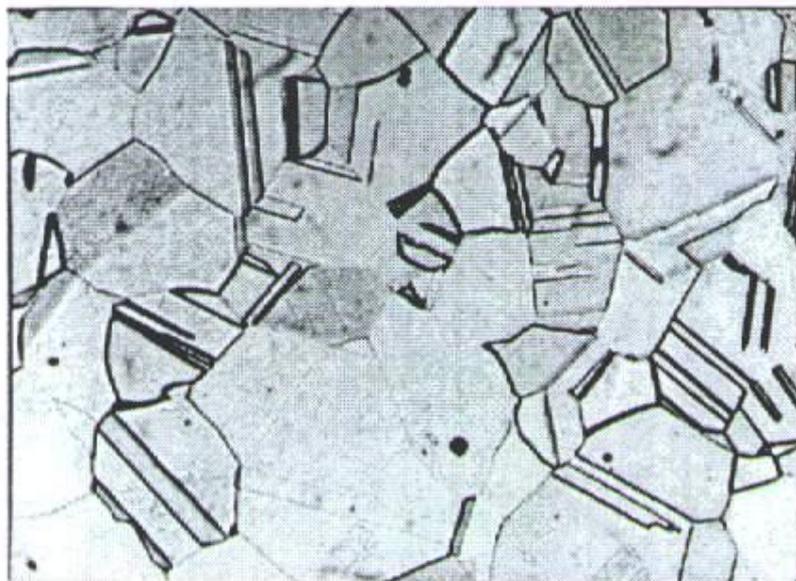
**单相黄铜**——如 H80, 含 80% Cu, 单相 $\alpha$ , 塑性好, 可冷成型

**双相黄铜**——如 H62,  $\alpha+\beta'$ , 可热变形

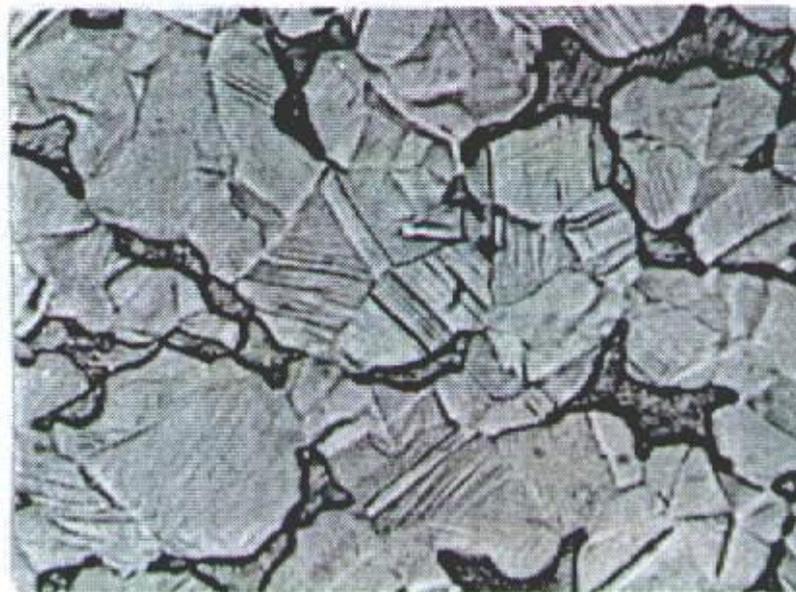


# 组织

(a) 单相黄铜  $\alpha$



(b) 双相黄铜  $\alpha + \beta'$



## Cu-Zn合金的显微组织

工业黄铜的实际锌含量多 $<47\%$ ，其退火组织可以是单相 $\alpha$ 或双相 $\alpha + \beta'$ 。

## 牌号、性能、用途

代号	化学成分, %		机械性能			
	Cu	Zn	加工状态	$\sigma_b$ MPa	$\delta$ %	HB
<b>H96</b>	95~97	余量	退火	250	35	—
H80	79~81	余量	退火	270	50	—
H68	67~70	余量	退火	300	40	—
H59	57~60	余量	退火 变形	300 420	25 5	— 103

① 单相黄铜H80、H70、H68 塑性很好，适于制作冷轧板材、冷拉线材、管材及形状复杂的深冲零件。

② 双相黄铜H62、H59 可进行热变形，常热轧成棒材、板材。可铸造。

## ②复杂黄铜——改善Cu-Zn合金的耐蚀性、机械性能。

组别	代号	主要化学成分, %		机械性能(变形)			
		Cu	其它	$\sigma_b$ MPa	$\delta$ %	HB	
Pb黄铜	HPb 63-3	62.0~65.0	Pb 2.4~3.0	600	5	—	钟表
	HPb 60-1	59.0~61.0	Pb 0.6~1.0	610	4	—	
Sn黄铜	HSn 90-1	88.0~91.0	Sn 0.25~0.75	520	5	148	海船
	HSn 62-1	61.0~63.0	Sn 0.7~1.1	700	4	—	
Al黄铜	HAl 77-2	76.0~79.0	Al 1.8~2.6	650	12	170	海船
Si黄铜	HSi 65-1.5-3	63.5~66.5	Si 1.0~2.0 Pb 2.5~3.5	600	8	160	船舶及 化工机械
Mn黄铜	HMn 58-2	57.0~60.0	Mn 1.0~1.2	700	10	175	
Fe黄铜	HFe 59-1-1	57.0~60.0	Fe 0.6~1.2	700	10	160	
Ni黄铜	HNi 65-5	64.0~67.0	Ni 5.0~6.5	700	4	—	

**编号：H+主加元素符号+铜质量分数+主加元素质量分数**



## 黄铜制品

环宇金属科技，品牌诚待天下！  
[www.huny.cn](http://www.huny.cn)

## (2) 青铜 —— Cu-Sn系合金

### 压力加工青铜

**Sn青铜** —— 如 QSn4-3, 含4%Sn、3%Zn, 其余为 Cu。做轴承、弹簧等。

**Al青铜** —— 如 QAl 10-3-1.5, 做耐蚀、抗磨的齿轮、轴套等

**Be青铜** —— 如 QBe2, 做重要弹簧, 高速轴承等。

**铸造青铜** —— 如Sn青铜, ZCuSn10Zn2。

船用青铜  
软管快速  
接头阀(锡  
青铜阀体、  
阀盖)



### (3) 白铜 —— Cu-Ni 系合金

- 以镍为主要合金元素，B（白）+镍质量分数，例B19
- 铜、镍无限固溶，单相 $\alpha$ ，
- 可冷、热变形，较好的强度和优良的塑性。它的抗蚀性很好，电阻率较高。
- 用于制造船舶仪器零件、化工机械零件及医疗器械等。

### 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，同时资源丰富，所以有着广泛应用前景。

但目前钛及钛合金的**加工条件复杂，成本较昂贵。**



美F-22战机约36%重量的零件用钛合金制造

环宇金属科技，品牌诚待天下！

[www.huny.cn](http://www.huny.cn)

# 1. 纯钛



## 性能：

- 银白色，熔点1680°C，密度4.54 g/cm<sup>3</sup>，比铝大但比钢轻43%。钛有很好的强度，约为铝的6倍，所以**钛的比强度（强度/相对密度）在结构材料中是很高的。**
- 钛的**抗氧化能力优于大多数奥氏体不锈钢。**

## 晶体结构

- 同素异构转变 —— 882.5°C时，  
密排六方  $\alpha$ -Ti  $\leftrightarrow$   $\beta$ -Ti（体心立方）

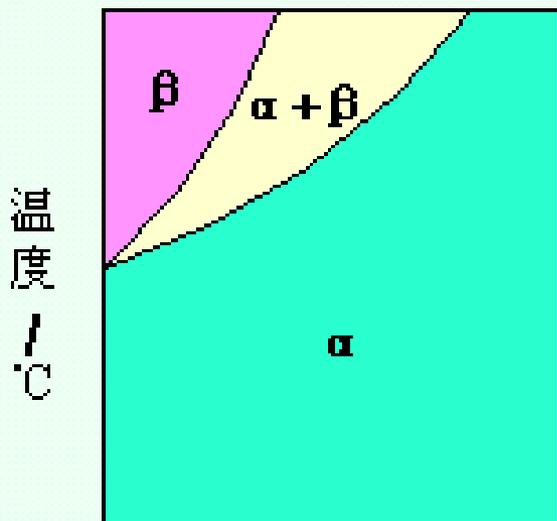
## 牌号及用途

- 工业纯钛 TA1~TA3，编号越大杂质越多
- 纯钛可制作在350°C以下工作的、强度要求不高的零件。

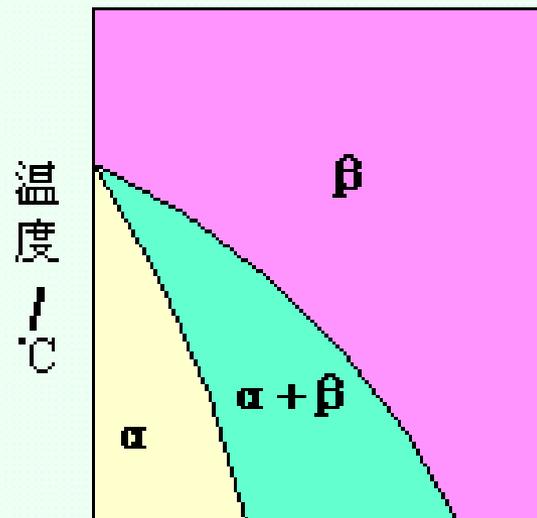
## 二、钛合金

合金元素溶入 $\alpha$ -Ti中，形成 $\alpha$ 固溶体，  
溶入 $\beta$ -Ti中形成 $\beta$ 固溶体。

铝、碳、氮、氧、硼  
等为 $\alpha$ 稳定化元素。



W% (合金元素) / %



W% (合金元素) / %

铁、钼、镁、铬、锰、  
钒为 $\beta$ 稳定化元素。

分类： $\alpha$  钛合金、 $\beta$  钛合金和( $\alpha + \beta$ ) 钛合金。

牌号分别以TA、TB、TC加上编号来表示。

## (1) $\alpha$ 钛合金



- ◆ 钛中加入**铝、硼**等 $\alpha$ 稳定化元素获得 $\alpha$ 钛合金。
- ◆  $\alpha$ 钛合金的**室温强度低于 $\beta$ 和 $(\alpha + \beta)$ 钛合金**，但**高温 $(500^{\circ}\text{C} - 600^{\circ}\text{C})$ 强度比它们的高**，并且组织稳定，抗氧化性和抗蠕变性好，焊接性能也很好。
- ◆  $\alpha$ 钛合金不能淬火强化，主要依靠**固溶强化**，热处理只进行**退火**(消除应力退火或再结晶退火)。
- ◆ **典型牌号：TA7**，成分：**Ti-5Al-2.5Sn**
- ◆ **用途**：使用温度 $\leq 500^{\circ}\text{C}$ ；主要用于制造导弹的燃料罐、超音速飞机的涡轮机匣等。

## (2) $\beta$ 钛合金

- ◆ 钛中加入**钼、铬、钒**等 $\beta$  稳定化元素得到 $\beta$  钛合金。
- ◆  $\beta$  钛合金有较高的强度、优良的冲压性能，并可通过**淬火和时效**进行强化。
- ◆ 在时效状态下，合金的组织为 $\beta$ 相和弥散分布的细小 $\alpha$ 相粒子。
- ◆ **典型牌号：TBI，成分：Ti-3Al-13V-11Cr**
- ◆ **用途：**一般在 350℃ 以下使用，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。



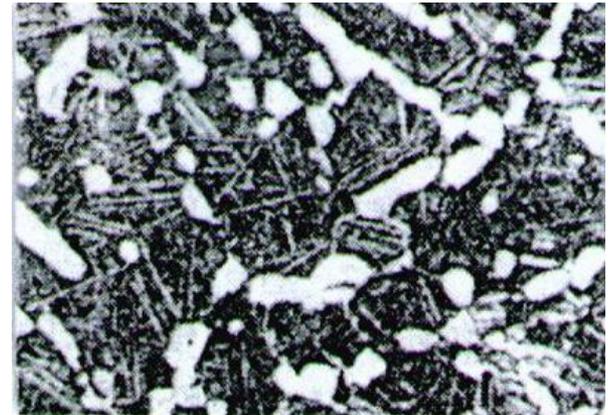
### (3) ( $\alpha + \beta$ )钛合金

- ◆ 钛中加入 $\alpha$ 和 $\beta$ 稳定化元素所得到的( $\alpha + \beta$ )钛合金，
- ◆ 塑性很好，容易锻造、压延和冲压，并可通过**淬火和时效**进行强化。热处理后强度可提高**50%~100%**

◆ **典型牌号：TC4，成分：Ti-6Al-4V**

◆ 强度高，塑性好，在400℃时组织稳定，蠕变强度较高，低温韧性好，抗海水应力腐蚀及抗热盐应力腐蚀

◆ 用途：在400℃以下长期工作的零件，要求一定**高温强度的发动机零件**，以及在**低温下使用的火箭、导弹的液氢燃料箱部件**等。



块状( $\alpha + \beta$ )基体+针状 $\alpha$

### 三、钛及钛合金的热处理

#### (1)退火

①消除应力退火， $450\sim 650^{\circ}\text{C}$ ，1~4h

②再结晶退火， $650\sim 850^{\circ}\text{C}$ ，1~3h

消除加工硬化。

#### (2)淬火和时效：适用 $\beta$ 钛合金和 $(\alpha + \beta)$ 钛合金

①目的：提高钛合金的强度和硬度。

②淬火温度： $\alpha + \beta$ 两相区的上部范围，淬火后部分 $\alpha$ 保留下来，细小的 $\beta$ 相转为成介稳定 $\beta$ 相或 $\alpha'$ 相或两种均有，经时效后获得好的综合机械性能。若加热到 $\beta$ 区， $\beta$ 晶粒极易长大，则热处理后的韧性很低。

③钛合金的时效温度一般在 $450^{\circ}\text{C}—550^{\circ}\text{C}$ 之间。

环宇金属科技，品牌诚待天下！

www.huny.cn

## 3.4.4 轴承合金

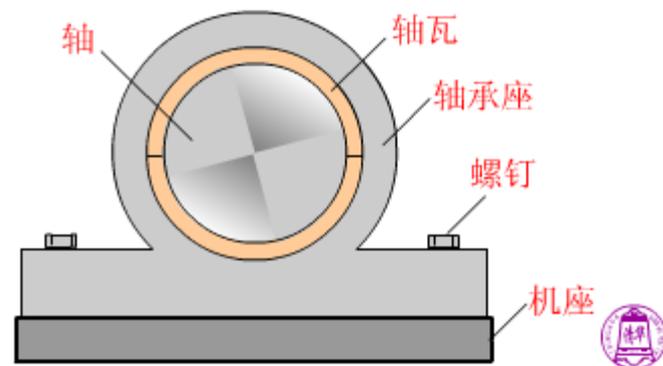
### ◆ 滑动轴承中的轴瓦及内衬的材料

### ◆ 工作条件：

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

### ◆ 性能：

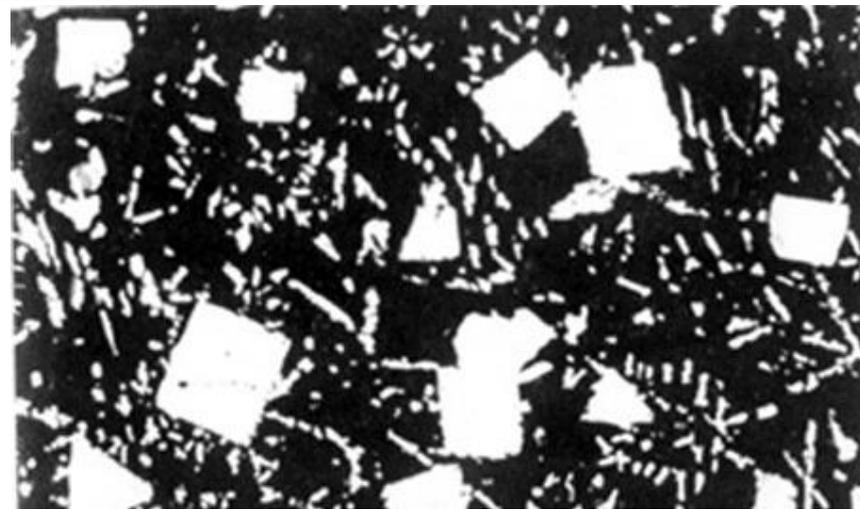
强硬度、塑韧性和疲劳强度高，与轴的磨合能力、减摩性好、导热、较小的膨胀系数、抗蚀性好



轴瓦

## ◆组织特点

**既软又硬：**在软基体上分布硬质点，或者在硬基体上分布软质点。



ZChSnSb11-6的组织，×100

软基体+硬质点

硬基体+软质点

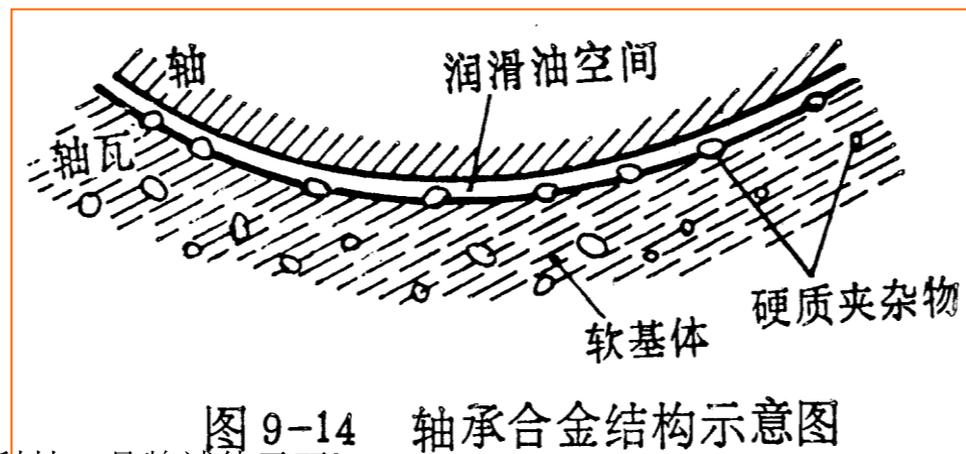


图 9-14 轴承合金结构示意图

工业上常用的是**锡基**、**铅基**轴承合金, 又称**巴氏合金**

◆**代号**: ZCh+基本元素符号 (Sn或Pb) +主加元素符号  
+主加元素含量+辅加元素含量。

Z——铸造, Ch——轴承

◆**ZChSnSb11-6**表示含 $w(\text{Sb})=11\%$ 、 $w(\text{Cu})=6\%$ 、余量为锡Sn的锡基轴承合金,

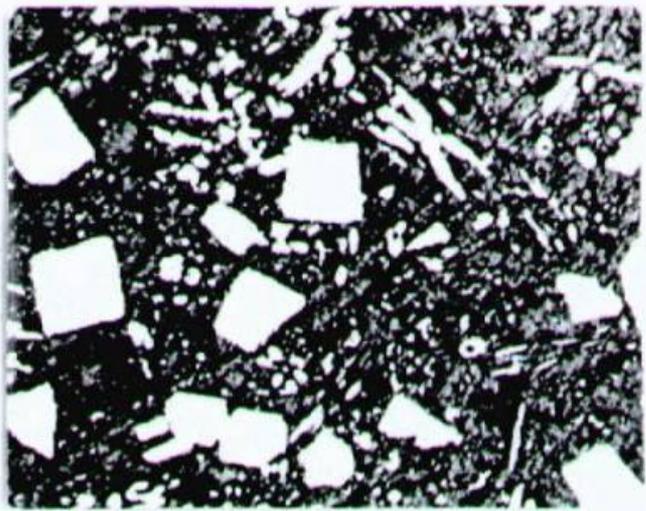
◆**ZChPbSb16-16-2**表示含 $w(\text{Sb})=16\%$ 、 $w(\text{Sn})=16\%$ 、 $w(\text{Cu})=2\%$ 、余量为铅Pb的铅基轴承合金。

## (1) Sn基轴承合金(锡基巴氏合金)

### 软基体硬质点

ZChSnSb11-6 (含11%Sb, 6%Cu, 余Sn)。

$\alpha$  软基体 + 硬质点 (白方块是  $\beta'$ -SnSb + 白针状  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ )



摩擦系数和膨胀系数小，塑性和导热性好，制造重要的轴承，如汽轮机、发动机和压气机等大型机器的高速轴瓦。但锡基轴承合金的疲劳强度较低，许用温度也较低(不高于150℃)。

## (2) Pb基轴承合金 (铅基巴氏合金)

也是一种软基体硬质点类型

ZChPbSb16-16-2

( $\alpha + \beta$ ) 共晶软基体 + 硬质点 (方块状SnSb+针状Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>)



合金的铸造性能和耐磨性较好(但比锡基轴承合金低), 价格较便宜, 可用于制造中、低载荷的轴瓦, 例如汽车、拖拉机曲轴的轴承等。

合金	牌号举例	牌号含义	性能	用途
铝合金	<b>LF5</b>	<b>5号</b> 防锈铝合金	耐蚀、塑性好	冷成型件
	<b>LY11</b>	<b>11号</b> 硬铝合金	强硬度高	冲压模锻件
	<b>LC4</b>	<b>4号</b> 超硬铝合金	高强	受力大结构件
	<b>LD7</b>	<b>7号</b> 锻铝合金	可锻、耐温	锻件
	<b>ZL102</b>	<b>2号Al-Si</b> 铸造合金	耐蚀, 铸造性好	汽缸、活塞
	<b>ZL201</b>	<b>1号Al-Cu</b> 铸造合金	耐热, 强度较高	较高温高强件
	<b>ZL301</b>	<b>1号Al-Mg</b> 铸造合金	耐蚀, 高强	舰船配件
	<b>ZL401</b>	<b>1号Al-Zn</b> 铸造合金	高强, 铸造性好	汽车飞机零件
铜合金	<b>H68</b>	含 <b>68%Cu(32%Zn)</b> 黄铜	塑性好	冷变形件
	<b>HPb59-1</b>	含 <b>59%Cu,1%Pb(40%Zn)</b> 黄铜	高强	船舶及化工零件
	<b>QA17</b>	含 <b>7%Al</b> 的铝青铜	高强, 耐磨, 耐蚀	船舶飞机零件
钛合金	<b>TC4</b>	<b>4号<math>\alpha+\beta</math></b> 型钛合金	高强, 耐蚀, 耐热	<400℃航空件
巴氏合金	<b>ZSnSb11Cu6</b>	<b>Sn</b> 基轴承合金	耐磨, 导热, 耐蚀	重型动力轴承
	<b>ZPbSb16Sn16Cu2</b>	<b>Pb</b> 基轴承合金	高温高强	低速低载设备