

# 铝铜锰钛系高强度铸造合金

王秉安 于传瑾

**摘要：**本文对合金的成分及熔炼工艺，回炉料对机械性能的影响，热处理工艺及铸造性能，进行了论述；观察和测试应力裂纹的产生及情况，定性地说明确抗应力腐蚀性能。

## 一、序 言

四十年代以后铝锌镁系铸造铝合金逐步发展起来，它具有强度高，切削加工性能好，尺寸稳定性高的优点，在国外已被广泛的开发和应用。七十年代我所曾研制出命名为ZL24(S)的铸造铝合金，将它列为所标准，应用于光学精密机械结构件的生产上，取得了良好的结果。但为了适应光学仪器发展的需要，特别是为了减轻仪器的重量，实现以铝合金部分的代替铸铁、铸钢和铜合金，为光学仪器制造和其他机械设备制造提供更优质的轻合金材料，我们开展了高强度铸造铝合金的研究。

在现用ZL24(S)铝合金的基础上，从提高锌量、镁量入手，经过百余炉次的试验，发现含锌量6.0%、镁2.0%、锰1.0%、铬0.2%、钛0.2%，这样成分配比的铝—锌—镁铸造合金具有很高的强度，抗拉强度超过490MPa，但是存在着严重的应力腐蚀问题。对多种高强度铝合金进行试验比较，其中以铝—铜—锰—钛合金比较满意。它不仅强度高，而且延伸率和冲击强度也很高，特别是这个合金具有良好的抗应力腐蚀性能。

三种合金的比较如表1、表2和表3。

表1 物理性能的比较（淬火时效后）

合 金	密 度 g/cm <sup>3</sup>	线 膨 胀 系 数 (20—100℃) × 10 <sup>-6</sup>	弹 性 模 量 GPa
ZL24 (S)	2.74	24.5	67.6
Al-6Zn-2Mg	2.78	20.5	70.6
Al-Cu-Mn-Ti	2.78	21.3	74.5—75.5

表2 机械性能的比较（淬火时效后）

合 金	抗拉强度 MPa	延伸率 δ%	冲击值 J/cm <sup>2</sup>	硬 度 HB
ZL24 (S)	254—343	1.5—3	2—3.4	90—110
Al-6Zn-2Mg	402—490	1.0	3.2	160—175
Al-Cu-Mn-Ti	402—461	2—3	30—40.7	143—156

注：ZL24(S)及ZL40(S)为我所自编的所标合金牌号。

表 3 抗应力腐蚀性能的比较

合 金	状 态	观 察 的 天 数				
		1—2天	8 天后	15 天后	45 天后	100 天后
ZL24(S)	淬火(水淬)+时效	○	×	××	××	××
	淬火(空冷)+时效	○	○	○	×	×
Al-6Zn-2Mg	淬火(水淬)+时效	×	××	××	××	××
	淬火(空冷)+时效	×(4天)	×	×	×	×
Al-Cu-Mn-Ti	淬火(水淬)+时效	○	○	○	○	○

注：符号表示：○——不裂

×——产生裂纹(含裂纹发展)

××——有的地方出现多道裂纹，应力腐蚀试验方法见(六)

## 二、ZL40(S)铝合金的化学成分

该合金属于铝—铜系，它的化学成分如下：4.8~5.5%铜，0.6—1.0%锰，0.2—0.4%钛，0.15—0.25%镉；其余为铝。主要杂质铁<0.3%，合金成分简单，不含稀贵金属。

铜是主要合金元素，能在铝中固溶强化，提高铝合金的机械性能，但铜的加入量不应超过它在铝中的最大溶解度(5.7%)，因为过量的铜，将产生针状脆性的 $Al_2Cu$ 。

锰能提高合金的常温和高温机械性能，同时改善合金的耐腐蚀性能。但锰的加入量大于1.0%后，合金变脆导致机械性能的下降。

钛主要起细化合金晶粒的作用。

这个合金主要是靠沉淀强化来提高机械性能，而镉的加入则改善了合金时效强化机构，使合金的强度增加68MPa左右，而且不降低延伸率。其加入量以0.2%为宜。

要尽量控制铁的含量，使其不超过0.3%，因为铁会形成复杂的脆性化合物，化合物中含有铜和锰，从而使铜和锰的强化作用减低，所以在这种合金中铁不仅降低延伸率，也降低强度。

## 三、合金的熔炼

1. 配料成分：利用优选法对合金成分进行了优选，认为下列配料成分最好，5.3%铜、0.8%锰、0.3%钛、0.21%镉、其余为铝。

采用电炉熔炼，各元素的分析结果见表4

表 4

加 入 元 素	铜	锰	钛	镉	铁
化学成分%	4.8—5.5	0.6—1.0	0.2—0.4	0.15—0.25	≤0.3
配料成分%	5.3	0.8	0.3	0.21	—
分析成分%	5.0—5.2	0.77—0.84	0.2—0.3	0.20	0.15—0.2

2. 原材料：铜、锰、钛分别以铝铜、铝锰、铝钛中间合金形式加入，镉以金属镉形式加入。技术要求见表 5。

表 5

炉 料 名 称	牌 号	成 分 %
铝 锭	特 1 号铝 (相当苏联 AOO)	Al ≥ 99.7%
Al—Cu 中间合金	自 制	含铜 50%
Al—Mn 中间合金	自 制	含锰 10%
Al—Ti 中间合金	自 制	含钛 4—6%
纯 镉	Cd <sub>2</sub>	≥ 99.95%

3. 熔炼过程：铝—铜、铝—锰、铝—钛中间合金和纯铝块随炉加入，熔化后 680—700℃ 加入金属镉，升温到 730—750℃ 用 0.6% 六氯乙烷进行去气处理，反应完后扒渣并搅拌防止成分偏析，静止 5 分钟左右，进行浇注。

合金的熔炼没有特殊要求，只是在熔炼过程中，要注意搅拌，使合金成分均匀，同时要加强通风，特别是在加镉时会产生黄红色烟气，对人体有害，因此更要注意。

#### 四、合金的热处理及金相组织

##### 1. 淬火保温时间的选择

充分发挥合金机械性能，为了缩短淬火保温时间，经过多次试验证明，在 540℃ 保温 12 小时后淬于 20—80℃ 热水中，则可以得到满意的机械性能。

淬火保温时间对机械性能的影响见表 6

表 6 淬火保温时间对机械性能的影响

保 温 时 间	抗 拉 强 度 MPa	延 伸 率 8%	试 棒 断 面 情 况
6 小 时	313.6—372.4	1.1	断面正常
12 小 时	401.8—460.6	2—3	断面正常
16 小 时	392—480.2	1.0—1.5	部分试棒断面有褐色物

##### 2. 淬火温度

淬火温度应严格控制在一定的温度范围内，试验证明：温度在 535—545℃ 这个范围内，合金的机械性能最好。特别是上限温度不应超过该合金的共晶温度 548℃，否则会引起过烧，导致机械性能急剧下降。淬火温度偏低，固溶强化效果不好，使机械性能达不到最高值。

##### 3. 时效温度和时间

利用优选法对温度和时间进行了选择，认为 175℃，保温 6 小时为最佳条件，这时机械性能最好而且时间也不拖长。

从表 7 中可见，时效温度为 175℃ 时综合机械性能最好。从表 8 中可见时效时间的长短对强度的影响不大，从节省工时，能源角度出发选用 6 小时。

表 7 时效温度对机械性能的影响 (保温11小时)

时效温度 $^{\circ}\text{C}$	抗拉强度 MPa	延伸率 $\delta\%$
145	401.8	2.5
175	453.7	1.5
190	439	1.0

表 8 时效时间对机械性能的影响 (温度175 $^{\circ}\text{C}$ )

保温时间	抗拉强度 MPa
6 小时	404.7
9 小时	401.8
13 小时	417.5

总结上述试验结果, 可认为采用540 $^{\circ}\text{C}$ 保温12小时, 水淬(20—80 $^{\circ}\text{C}$ )之后, 175 $^{\circ}\text{C}$ 时效6小时的热处理规范是恰当的。不仅可以得到满意的机械性能, 而且数据稳定。表9是H234炉试棒按这一规范热处理后的机械性能试验记录, 每根试棒强度都在441MPa以上。(试棒为砂型铸造经过机械加工。)

表 9 H234 炉 机 械 性 能

试棒编号	试棒直径 mm	最大载荷 N	机械性能		备注
			$\sigma_b$ , MPa	$\delta\%$	
1	$\phi$ 11.1	43120	444.9	—	断在标外
2	$\phi$ 10.	39200	495.9	1.8	
3	$\phi$ 11.15	45570	450.8	1.7	
4	$\phi$ 9.85	35084	461.6	2.5	

合金的金相组织: 如图 1

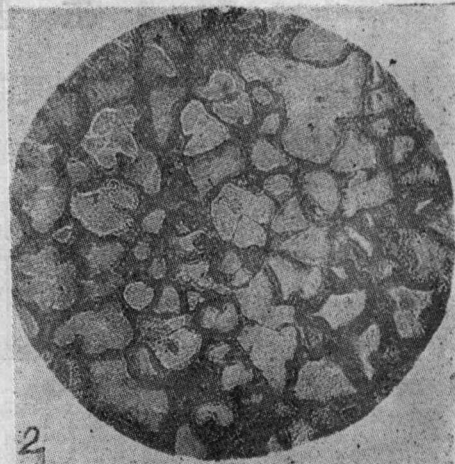
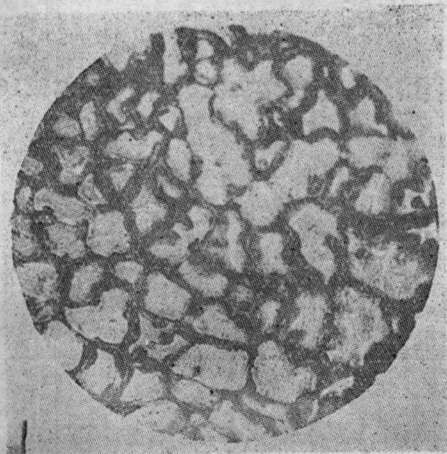
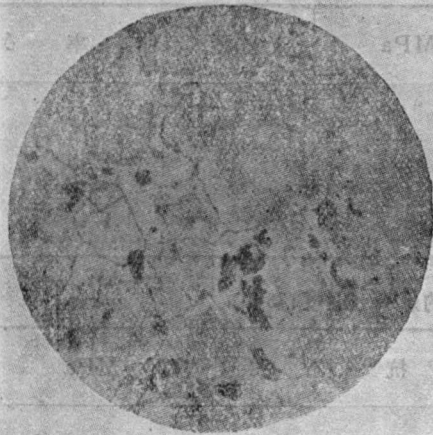


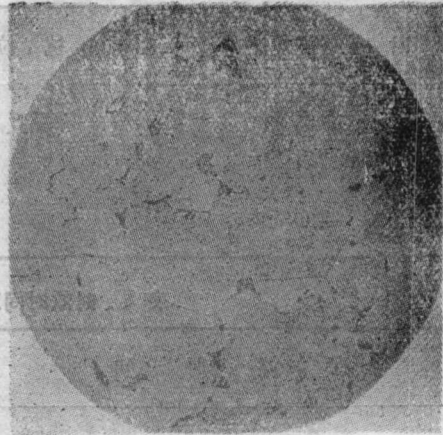
图 1 (a) 铸态 $\times 100$

(b) 铸态时效 $\times 100$

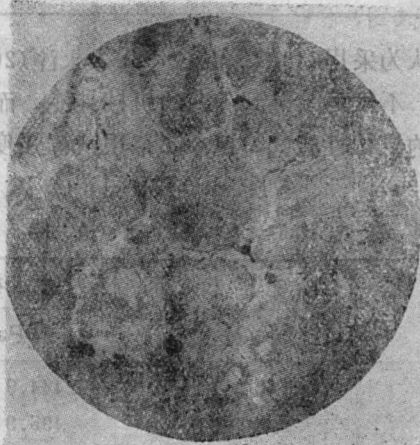
(如小口磁器) 即深而薄封耐时以室高致神 1 案



(c) 不含镍的合金组织淬火(水冷)  
+ 时效×100



(d) 含镍的合金组织淬火(水冷)  
+ 时效×100



(e) 淬火(空冷) + 时效×100

## 五、合金的机械性能

1. 试验条件: 将石墨坩埚放入电阻丝炉内加热熔炼, 每次熔化2.5kg、5 kg或16kg, 以湿砂型分别浇注4根、8根和28根试棒。

2. 合金的各种性能见表10。

表10 铝铜锰钛合金的各种机械性能

热 处 理 状 态	抗 拉 强 度 MPa	屈 服 强 度 MPa	延 伸 率 $\delta$ %	布 氏 硬 度 HB	冲 击 值 J/cm <sup>2</sup>
铸 态	166.6—186.2	—	3—6	62	—
铸 态 时 效	176.4—225.4	—	3—6	76	18.1—19.1
淬 火 (空 冷) + 时 效	294—323.4	—	3—4.5	100	—
淬 火 (水 冷) + 时 效	392—480	343—392	2—3	143—156	36.3—41.3

### 3. 镉量对机械性能的影响

从表11所列数据可以看出，不加镉时，虽然延伸率较高，但强度上不去，加入0.2%的镉效果很好，使抗拉强度提高68MPa以上，从而得到很高的机械性能。

表11 镉量对机械性能的影响

镉加入量 %	抗拉强度 MPa	延伸率 $\delta$ %	硬度 HB	试棒断面 情况
0	294—392	2.5—4	120—130	断面正常
0.2	401.8—460.6	2—3	143—156	断面正常

### 4. 回炉料对机械性能的影响

确定回炉料的影响，在实际生产中有很大意义。从实验中可以得到这样的认识，只要含铁量不过高 ( $<0.3\%$ )，即使全部采用一、二级回炉料，对机械性能也没有影响。

表12是全部采用回炉料的 H218 炉的试验数据，从表中可以看到，每根试棒的机械强度都超过392MPa，延伸率为2—3%。

表12

热处理形式	试棒编号	试棒直径 mm	最大载荷 N	机械性能		备注
				$\sigma$ , MPa	$\delta$ %	
淬火+时效	1	11.0	38220	405.7	—	断在标外
淬火+时效	2	11.0	40180	422.4	2	
淬火+时效	3	10.8	38612	419.4	3	
淬火+时效	4	9.95	30772	453.7	—	断在标外

## 六、合金的铸造性能

合金的铸造性能是十分重要的。铝锌镁系 ZL24(S) 铸造铝合金已经投入生产 20 多年了，用它生产了几十万个零件，铸造性能是良好的，将铝铜锰钛合金与 ZL24(S) 合金的流动性，抗热裂性和线收缩方面进行比较。

### 1. 合金流动性的比较

采用螺旋型试样，用含水5.0%的型砂造型之后在室内自然干燥一昼夜，然后合箱，700℃浇注试样，结果如表13。

表13

合金牌号	浇注温度 ℃	螺旋试样长度 (mm)
ZL24 (S)	700	300
铝铜锰钛合金	700	380

铸造生产实际表明，中小型比较复杂的铸件都铸得很好，可见流动性完全能够满足生产的要求。

### 2. 合金抗热裂性的比较

应用热裂环的原理结合实际情况，进行比较试验。

#### 实验方法

用一个金属模样（如图2），造几个型腔并开好相同的浇注系统，然后放入不同直径的热裂环（环厚5mm，中心孔 $\phi 20\text{mm}$ ），放好后合箱，710℃浇注，冷却后打箱观察热裂情况，结果如表14。

表14

合金牌号	浇注温度 ℃	热裂环宽度 mm
ZL24 (S)	710	12.5
铝铜锰钛合金	710	15.0

由表14可见，ZL40(S)比ZL24(S)热裂倾向稍大，在浇注大而薄的壳体零件时，应采取工艺措施防止热裂产生。

### 3. 合金收缩值的比较

#### 实验方法

用一个长448mm，宽46mm，厚10mm的光滑木样子造型，然后准确的测量潮型型腔的尺寸，合箱后于700℃浇注，冷却至常温，打箱测铸件长度，计算线收缩值。结果如表15。

表15

合金牌号	浇注温度 ℃	型腔长度 mm	铸件长度 mm	线收缩值 %
ZL24 (S)	720	449.0	441.5	1.5
ZL40 (S)	720	449.0	443.5	1.1

综上所述，ZL40(S)合金的铸造性能，能满足生产要求，在砂型铸造中可以得到广泛应用。

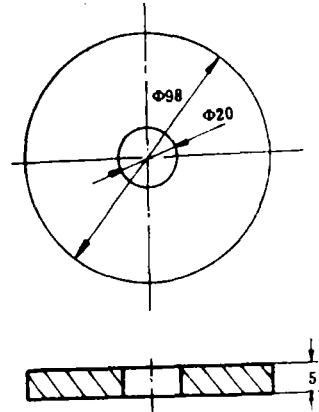
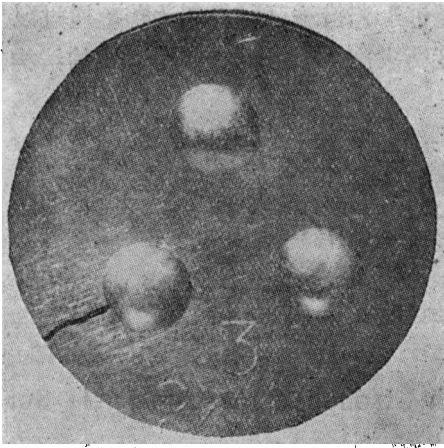


图 2

## 七、合金抗应力腐蚀性能

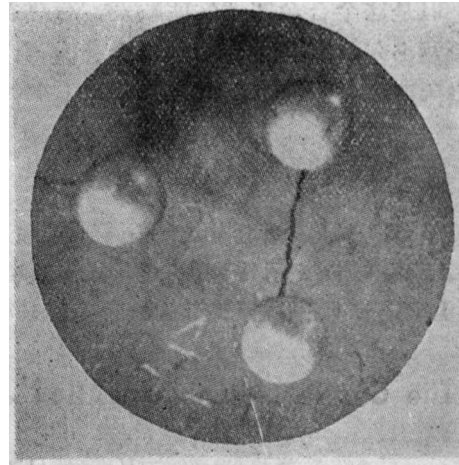
### (1) 试验方法

在 $\phi 28\text{mm}$ ，厚10mm左右的试片上，均匀打三个压痕点（图3），每次打压痕的条件相同。钢球直径 $\phi 10\text{mm}$ ，加载3000kg，保压时间10s，每个压痕点离试片边缘保持8mm，打完压痕后，试片处于应力状态，放在室内，观察出现裂纹的时间，出现裂纹的时间越晚，出现裂纹的数越少，表明合金抗应力腐蚀性能就越好。



(a)

ZL24(S) 铝合金, T<sub>0</sub>状态  
7—8 天后开始裂



(b)

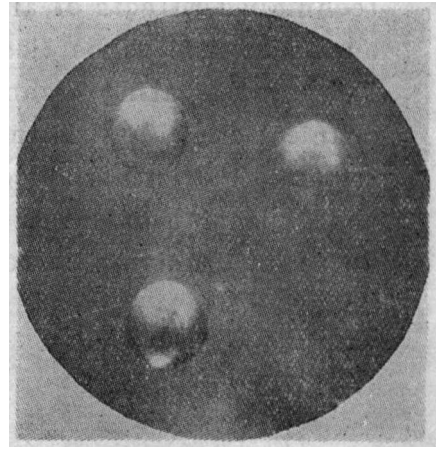
Al-6Zn-2Mg 铝合金, T<sub>0</sub>状态  
1—2 天后开始裂

图 3

### (2) 试验结果

采用上述试验方法, 从表 3 和图 3, 可见 ZL40(S) 铝合金有很好的抗应力腐蚀性能, 远远超过我们使用的 ZL24(S) 铝合金, 共试验三批 15 个试片, 所有的点都没有应力腐蚀裂纹。

这个合金的另一个特点, 就是对裂纹不敏感。打压痕点时, 有意靠近边缘, 在应力的作用下即使出现裂纹, 可是裂纹长时间保持原状, 没有新的发展。ZL24(S) 铝合金则不然, 一旦出现裂纹, 在半个月之内裂纹就可以从试片的边缘一直向里发展到压痕点的边缘, 这说明 ZL24(S) 铝合金比 ZL40(S) 铝合金对裂纹的敏感性大。



(c)

Al-Cu-Mn-Ti 铝合金, T<sub>0</sub>状态  
120 天没有出现裂纹

## 八、结 束 语

实践证明, 铝铜锰钛系高强度铝合金 ZL40(S) 具有下列优点。

1. 机械性能高, 特别是抗冲击性能很高, 淬火 (水淬) 时效后, 采用  $10 \times 10 \times 55$  无缺口试样, 抗冲击性能平均为  $36.3 \text{ J/cm}^2$ , 比一般铝合金高 6—8 倍。
2. 与 ZL24(S) 铝合金相比, 合金具有很好的抗应力腐蚀性能。
3. 具有良好的机械加工性能。
4. 弹性模数高, 线膨胀系数较小, 有利于零件的尺寸稳定性。
5. 合金熔化以后, 抗氧化能力强, 表面呈现出光亮的金属镜面, 熔炼工艺简单, 不需要复盖剂。

但是这个合金铸造性能较差，有热裂倾向，通过工艺措施可以得到改善。通过以上研究试验及多年生产实践，认为这个合金可以用于强度要求高，受振动和冲击载荷的结构件上以及壳体罩体等壁厚24mm的零件的生产上。

参 考 文 献

- [1] 〔日〕神尾一、北岗山治等；轻合金加工技术，1986, No.11, 33
- [2] 程家宁等；特种铸造及有色合金，1989, No.5
- [3] 大连工学院机械系铸工专业；铸工，1971, 12, No.38—40

**The Casting Aluminium Alloy with High Strength in Al-Cu-Mn-Ti Series**

Wang Bingan Yu Chuanjin

**Abstract**

This paper describes alloying compositions and melting technique. Effects of alloying compositions and the scrap on mechanical properties have been studied. The satisfactory heat-treating technique has been determined. The mechanical and the casting property have been tested. A test method is introduced to observe the development and the expansion of the causing stress crack. The property on resisting stress corrosion has been qualitatively explained.