

# Cd 对 AlSi7Cu2Mg 合金机械性能 和组织的影响<sup>①</sup>

桂满昌 贾 均 李庆春

(哈尔滨工业大学铸造教研室, 哈尔滨 150006)

## 摘 要

研究了 0~0.5% Cd 对铸造 AlSi7Cu2Mg 合金机械性能和组织的影响。在该合金中加入适当微量 Cd 能使热处理后的抗拉强度提高 25 MPa 以上。合金含有 0.15%~0.3% Cd 时具有好的综合性能。Cd 提高合金的强度是由于它促进 Cu 的时效强化引起的。Cd 在该合金  $\alpha$ -Al 基体中的固溶量有限, 不能固溶的 Cd 形成多种类型富 Cd 相, 降低热处理后的机械性能。

**关键词:** Al-Si-Cu-Mg 合金 Cd 机械性能 显微组织

在 Al-Cu 系合金中, 添加 Cd、Be、In 等微量元素, 对其热处理时效过程有很大的影响, 关于这方面的研究已有许多报导<sup>[1-3]</sup>。Al-Cu 合金中加入微量的 Cd 使  $\text{CuAl}_2(\theta)$  相的时效沉淀过程从  $\text{GP}_1 \rightarrow \text{GP}_1 - \theta' \rightarrow \theta$  变化为  $\text{GP}_1 \rightarrow \theta' + \text{P} + \text{Cd}' \rightarrow \theta' + \text{Cd}' \rightarrow \theta + \text{Cd}$ , 甚至加入量小于 0.05%, Cd 都将强烈抑制时效过程的 GP 区产生, 而促进  $\theta'$  的析出<sup>[4]</sup>。微量元素在 Al-Cu 合金中的这种作用, 已应用于实际生产来提高合金的机械性能。我国的高强 Al-Cu 合金 ZL205 就是添加了微量的 Cd, 文献<sup>[5]</sup> 研究分析了 Cd 对 ZL205 合金组织和性能的影响。但是对于 Al-Si 含 Cu 合金、添加微量的这些元素, 对其性能和组织的影响还很少有文献报导。Al-Si 系铸造合金具有优良的铸造性能, 在实际应用研究中, 如何利用 Al-Si 合金这种优点, 进一步提高其机械性能, 挖掘其潜力是人们十分关注的问题。

AlSi7Cu2Mg 合金铸造 Al-Si 系高强度合金, Cu 含量较高, 时效组织中主要是  $\text{CuAl}_2$ 。

本文目的就是研究微量 Cd 对该合金机械性能和组织的影响, 探索进一步提高该合金机械性能的可能性。

## 1 试验条件及方法

本次试验所用的原料为: 纯 Al(99.9%)、纯 Mg(99.9%)、结晶 Si(99.7%)、电解 Cu(99.5%)、电解 Mn(99.5%)、纯 Cd(99.9%)。

用石墨坩埚盛试料在 SG2-7.5-12 型电阻炉中进行合金熔炼, 每次熔化量为 2 kg。Mg 和 Cd 以纯金属加入, 其它元素均以中间合金的方式加入。熔体用 Sr 以 Al-4.35% Sr 中间合金形式进行变质处理, 变质前用 0.4%  $\text{C}_2\text{Cl}_6$  + 0.4%  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  对熔体进行精炼。

室温机械性能测试试样用单铸的方法, 尺寸标准按 GB1173-86 的要求。高温性能试样先铸成  $d 12 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$  的圆棒, 热处理后加工成  $d 6 \text{ mm}$  的标准试样, 所有性能试样均为砂型浇注。试样采用  $T_6$  热处理, 工艺为: 490 °C,

① 收稿日期: 1993 年 7 月 25 日; 修回日期: 1993 年 10 月 15 日

3h+510℃, 6h+525℃, 6h 固溶 70℃水淬, 175℃, 6h 时效。

试样分析使用 JCSA-733 型电子探针和 S-570 型扫描电镜(配带能谱仪); 微观硬度用 HMT 硬度仪进行测定; 机械性能采用万能电子拉伸试验机测试。

表 1 试验合金化学成分

| 元素         | Si  | Cu  | Mg   | Mn   | Fe   | Cd    | Al |
|------------|-----|-----|------|------|------|-------|----|
| 含量 (wt.-%) | 6.5 | 2.5 | 0.25 | 0.25 | 0.15 | 0-0.5 | 其余 |

## 2 试验结果与分析

### 2.1 Cd 对合金机械性能的影响

在 Al-Cu 系合金中, Cd 改变合金时效机制和提高合金强度的加入量一般为 0.15%~0.25%。本文选择 Cd 的试验区域为 0~0.5%, 对于各种 Cd 含量的试验, Cd 均为合金中最终含量。每种机械性能数据都为四根试棒测试平均值。图 1 是 Cd 量与合金机械性能的关系。250℃性能测试是在试棒保温 30min 以后进行的。

在 Cd 试验的区域内, 合金的室温和 250℃高温强度随 Cd 量的增加先上升后下降, 就提高合金强度而言, Cd 的含量具有一个最佳范围。当 Cd 量为 0.1% 时强度已有提高。Cd 量为 0.2% 和 0.3% 时室温强度比不加 Cd 的提高 25MPa, 对应的 250℃强度提高 30MPa, 但是 Cd 量大于 0.4% 时, 强度趋于降低。合金的室温延伸率在 0.1%~0.3% 区域基本不变化, 但在 0.1%~0.3% 区域基本不变化。低量的 Cd 对高温延伸率有利, 但超过 0.3% 时高温延伸率明显下降。可见, Cd 在 0.15%~0.3% 时, 合金具有良好的综合机械性能。

不同 Cd 量对合金铸态和 T<sub>6</sub> 处理后 α-Al 基体显微硬度的影响如图 2 所示, 每个试验点是 10 个测试值的平均值。Cd 引起铸态和 T<sub>6</sub> 处理的 α-Al 基体显微硬度的变化趋势是一致的, 两者开始时都随 Cd 的增加而上升, 0.2% Cd 以后趋于相对稳定。Cd 对铸态和热处理后

的 α-Al 基体显微硬度的影响程度是不同的, 铸态显微硬度的增量比热处理以后的要小得多。

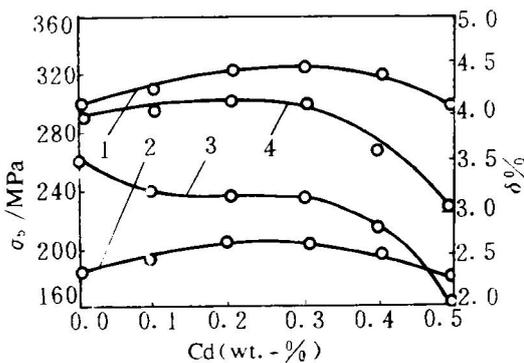


图 1 Cd 对合金机械性能的影响

1—室温强度; 2—250℃强度;  
3—室温延伸率; 4—250℃延伸率

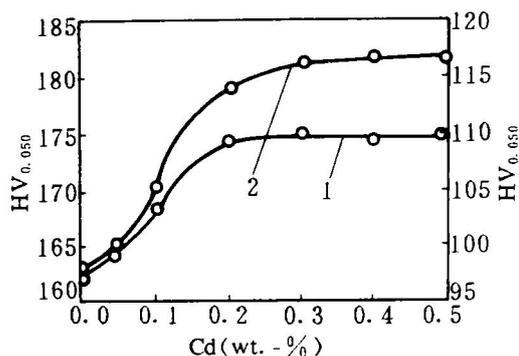


图 2 Cd 对 α-Al 基体显微硬度的影响

1—铸态硬度值, 对应右坐标标度;  
2—热处理后硬度值, 对应左坐标标度

### 2.2 Cd 在合金中分布及存在状态

在 Al-Cu-Cd 系中, 存在三种可能的转变<sup>[6]</sup>: (1) 587℃下, Al<sub>(液)</sub>→Cd<sub>(液)</sub>+CuAl<sub>2</sub>; (2) 545℃下, Al<sub>(液)</sub>→Al+CuAl<sub>2</sub>+Cd<sub>(液)</sub>; (3) 314℃下, Cd<sub>(液)</sub>→Cd+Cu<sub>5</sub>Cd<sub>3</sub>。在工业应用 Al-Cu 多元合金微量 Cd 条件下, 它主要固溶于 α-Al 基体中或以纯质点存在<sup>[7]</sup>。在 Al-Si-Cu 合金中, 加入少量 Cd, 由于该合金 Al、Si 二元共晶温度为 577℃, Al、Si、Cu 三元共晶温度为 525℃, 因此可以确定 Al-Cu-Cd 中的前二两种转变在我们所研究的合金中不可能出现。分析表明 Cd 在该合金中存在形式是多样的。图 3 是有关 Cd 相的电子扫描定性分析结果。可见 Cd、

Cu 和 Mg 可以同时富集。对铸态和较高 Cd 量热处理以后的试样进一步定量分析表明, Cd 除固溶于  $\alpha$ -Al 基体中以外, 还以几乎为纯 Cd 相、三元化合物  $Al_3CuCd$ , 以及四元 Al、Cu、Cd、Mg 相存在, 说明在该合金中 Cd 的存在是复杂的, Cd 和合金中其它元素存在复杂的作用。表 2 是 Cd 相能谱定量分析结果。

对于 Cd 在  $\alpha$ -Al 基体中的固溶情况, 用电子探针进行了测定, 结果见表 3。表中每个值是 10 个不同位置的测量值的平均值。

以上结果表明不论是铸态还是热处理态, Cd 在  $\alpha$ -Al 基体中的固溶量随着合金中的 Cd 含量的增加而提高, 但在 0.3% 的 Cd 以后, 基

表 2 富 Cd 相能谱定量分析结果

| 元素      | Al | Cu    | Cd    | Mg    |       |
|---------|----|-------|-------|-------|-------|
| 含量      | 1  | 0.47  | 0.63  | 98.90 | 0.00  |
| (wt.-%) | 2  | 57.22 | 13.56 | 29.22 | 0.00  |
|         | 3  | 21.29 | 13.38 | 47.21 | 18.12 |

表 3 不同 Cd 量合金  $\alpha$ -Al 基体中 Cd 的固溶量

| Cd 的含量<br>(wt.-%) | $\alpha$ -Al 基体中 Cd 的固溶量(wt.-%) |       |
|-------------------|---------------------------------|-------|
|                   | 铸态                              | 热处理后  |
| 0.05              | 0.030                           | 0.048 |
| 0.1               | 0.040                           | 0.097 |
| 0.2               | 0.057                           | 0.144 |
| 0.3               | 0.062                           | 0.221 |
| 0.4               | 0.068                           | 0.024 |
| 0.5               | 0.069                           | 0.223 |

本趋于平衡, 达到相对的稳定。Cd 在该合金中  $\alpha$ -Al 基体内的固溶量是相当有限的。

Cd 对研究合金机械性能的影响是由 Cd 的存在状态和改变热处理时效机制这两个因素决定的。在铸态条件下,  $\alpha$ -Al 基体显微硬度的提高是 Cd 的固溶强化引起的, 铸态显微硬度的变化和其 Cd 的固溶量变化是一一对应的。

在 Al-Cu-Cd 合金中, Cd 降低 GP 区的形成

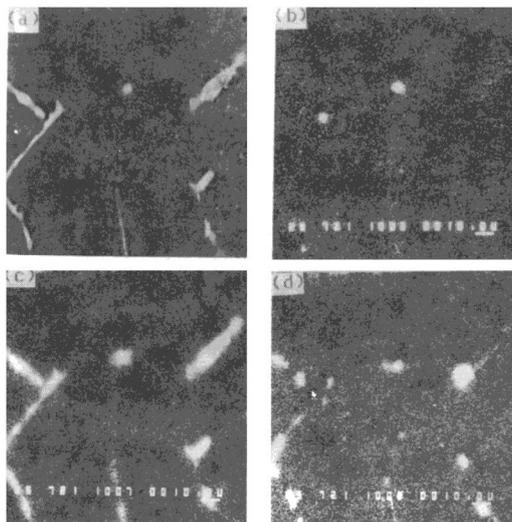


图 3 电子探针 Cd 相面扫描(铸态试样, 0.2% Cd)  
(a) — 背散射电子像; (b) — Cd; (c) — Cu; (d) — Mg

速度,加速后期的时效进程。这是由于形成Cu-Cd-空位族团,以致于长时间地保持有效的扩散空位,降低 $\theta'$ 和基体间的界面能,结果降低GP的数量和形成速度,而使 $\theta'$ 沉集加快。使之更细小和密集<sup>[6]</sup>。因此Cd促进了时效强化效果,使机械性能提高。对于当前的合金,透射分析表明微量的Cd在Al-Si-Cu合金中也有类似于在Al-Cu合金中的作用,即增加T<sub>6</sub>处理后 $\alpha$ -Al基体中 $\theta'$ 相的密度。

热处理后合金强度和 $\alpha$ -Al基体显微硬度的提高主要由Cd增强时效强化而引起,但产生这种作用的Cd量及Cd在 $\alpha$ -Al基体中的固溶量都有一定限度,因此它的强化作用也具有一个极限。

上面已分析了Cd在合金 $\alpha$ -Al基体中的固溶量,对于热处理态,其极限值约为0.22%,不能固溶的Cd将以各种富Cd相析出。对于这些富Cd相没有进行深入的结构分析,但就纯Cd来说,它是A<sub>3</sub>结构,而Al是A<sub>1</sub>结构,且晶格常数相差很大,不能形成共格效应。另一方面Cd比Al更软,因此这些富Cd相对合金强化是有害的。同时,富Cd相是多元低熔点共晶产物,多数存在于多元共晶区,弱化晶界,对机械性能不利。当这些相的数量超过一定值时,将会导致机械性能降低。性能测试已表明,Cd量大于0.3%时,机械性能开始下降,0.4%以后下降更明显。对拉伸试样断口扫描能谱分析发现,含0.4%和0.5%Cd的试样断口表面存在相当多的富Cd相。图4表示断口表面上的Cd相质点,其成分是表2中的第2种,为Al、Cu、Cd三元化合物,可以看出富Cd相和基体已基本脱离。对于含Cd为0.3%以下的合金拉伸断口几乎找不到富Cd相。

### 3 结论

(1) 在铸造AlSi7Cu2Mg合金中加入适量的Cd能使T<sub>6</sub>热处理后的室温强度提高25

MPa,250℃强度提高约30MPa。Cd在0.15%~0.3%时,合金具有良好的综合性能。



图4 拉伸断口表面上富Cd相质点

(2) 在该合金中,无论是铸态还是热处理后Cd在 $\alpha$ -Al基体中的固溶度都是有限的。合金热处理后强度提高是由于Cd促进时效强化引起的。

(3) Cd在该合金中以多种形式存在,除固溶 $\alpha$ -Al基体以外,还有相当于纯Cd相、Al<sub>2</sub>CuCd以及更复杂的富Cu、Mg、Cd、Al化合物存在。

(4) 0.3%Cd以后的合金延伸率和强度下降,是由于不能固溶于 $\alpha$ -Al基体的Cd,形成低熔点的软质富Cd相引起的。

### 参考文献

- 1 Silcock J M *et al.* J Inst Metals, 1955—56, 84: 23.
- 2 Silcock J M. Philoso Mag, 1959, 4: 1187.
- 3 Karov J *et al.* Mater Sci Tech, 1986, 2: 547.
- 4 Sankaran R and Laird C. Mater Sci Eng, 1974, 14: 271.
- 5 刘伯操等. 见: 铸造学会“特种铸造及有色合金”学组第一届学术会议论文集, 1981, 1.
- 6 Mondolfo L F. Aluminum Alloys. Structure and Properties, Boston; Butterworths, 1976.
- 7 龚磊清等. 铸造合金相图谱. 长沙: 中南工业大学出版社, 1987.