

# 时效对快速凝固铝锂合金 组织和性能的影响

焦成革 于桂复 张少卿 颜鸣皋

(北京航空材料研究所 2 室, 北京, 100095)

## EFFECT OF AGING ON MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF RAPID SOLIDIFIED Al-Li ALLOY

Jiao Chengge, Yu Guifu, Zhang Shaoqing, Yan Minggao

(Faculty 2 of Institute of Aeronautical Materials Beijing, Beijing, 100095)

**摘要** 研究了时效对快速凝固 Al-3.2Li-1.2Mg-0.3Cu-0.2Zr 合金拉伸性能和微观组织的影响。结果表明, 低温长时间时效达到接近峰值状态, 合金的综合性能优于高温短时间时效达到峰值状态的综合性能。合金中主要强化相为  $\delta'$  ( $\text{Al}_3\text{Li}$ )相, Cu、Mg 起固溶强化。合金中 Zr 主要以亚稳态的  $\text{Al}_3\text{Zr}$  存在, 并同时与  $\delta'$  相形成  $(\delta' / \text{Al}_3\text{Zr})$ 相。文中讨论了影响合金塑性的因素, 指出界面析出相是快速凝固 Al-Li 合金中值得重视的问题。

**关键词** 固化, 铝锂合金, 时效

**中图分类号** V252.2, TG156.92, TG146.2

**Abstract** Effect of aging on tensile properties and microstructure of rapid solidified Al-3.2Li-1.2Mg-0.3Cu-0.2Zr was studied. The results showed that tensile properties obtained by aging for long time at relatively low temperature were more desirable than those obtained by aging for short time at high aging temperature. The primary strengthening phase was  $\delta'$  and Cu, Mg was for solution strengthening. Zirconium existed primarily in forms of metastable  $\text{Al}_3\text{Zr}$  and duplex  $\delta' / \text{Al}_3\text{Zr}$ . Factors affecting the ductility of the RS Al-Li alloys were discussed, and it was suggested that powder boundary precipitations were worthy of note for RS Al-Li alloys.

**Key words** Solidification, Aluminum-lithium alloy, aging

快速凝固铝锂合金粉末冶金工艺主要为粉末制取、粉末处理、成型及合金热处理。合金性能不仅与成分有关, 还受各种工艺因素影响。二元铝锂合金的强化主要依赖高体积分数的  $\delta'$  ( $\text{Al}_3\text{Li}$ )超点阵相, 该相与基体完全共格, 错配度小(-0.08%)<sup>[1]</sup>; 它的存在是铝锂合金低塑性的重要原因。普遍认为控制与调整  $\delta'$  尺寸, 并设法引入半共格析出相和控制弥散相对获得性能良好的合金十分重要。本文以快速凝固 Al-3.2Li-1.2Mg-0.3Cu-0.2Zr 合金为对象, 研究时效对合金拉伸性能的影响并讨论了合金强化及影响合金塑性的组织因素。

### 1 试验条件及试验方法

试验原料为工业纯铝, 纯镁, 纯锂及 Al-Zr, Al-Cu 中间合金。制备粉末铝锂合金的

1993年7月17日收到, 1994年1月22日收到修改稿

工艺过程如图 1 所示。合金在 Ar 气保护下的熔炼, 雾化气体为超音速 Ar 气, 合金液温

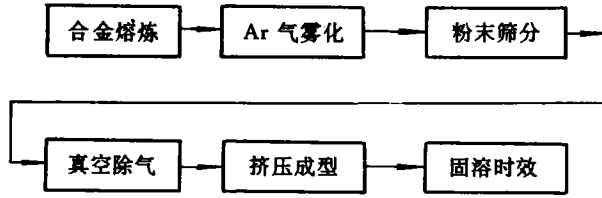


图 1 制备粉末铝锂合金的工艺过程

度为  $820^{\circ}\text{C}$ 。粉末粒度范围  $<200\mu\text{m}$ , 平均直径  $54\mu\text{m}$ 。粉末除气后直接挤压成直径  $17\text{mm}$  的棒材, 挤压比  $34:1$ , 合金密度  $2.46\text{g}/\text{cm}^3$ 。挤压棒经  $533^{\circ}\text{C}$ 、 $30\text{min}$  固溶处理后, 在不同温度和时间时效。合金室温拉伸试样为直径  $5\text{mm}$  光滑试棒, 用 H-800 透射电镜及 JOEL-733 扫描电镜观察合金组织与断口。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 时效对合金室温拉伸性能的影响

合金经  $533^{\circ}\text{C}$  固溶处理  $30\text{min}$  后, 分别取  $105^{\circ}\text{C}$ 、 $125^{\circ}\text{C}$ 、 $145^{\circ}\text{C}$ 、 $165^{\circ}\text{C}$ 、和  $185^{\circ}\text{C}$  时效  $6\sim 80\text{h}$ 。图 2 是不同时效温度和时效时间对合金拉伸性能的影响, 可见不同的时效温度具有不同的时效硬化效应。 $165^{\circ}\text{C}$  时效合金强度迅速提高, 塑性下降; 达到峰值后强度又很快下降, 此温度为峰时效温度。 $185^{\circ}\text{C}$  时效强度不断降低, 此时为过时效状态。降低时效温度至  $125^{\circ}\text{C}$ , 合金强度随时效时间的延长逐渐增加, 塑性缓慢下降, 经较长时间时效后 ( $50\sim 80\text{h}$ ) 可以获得强度与塑性的较好配合。

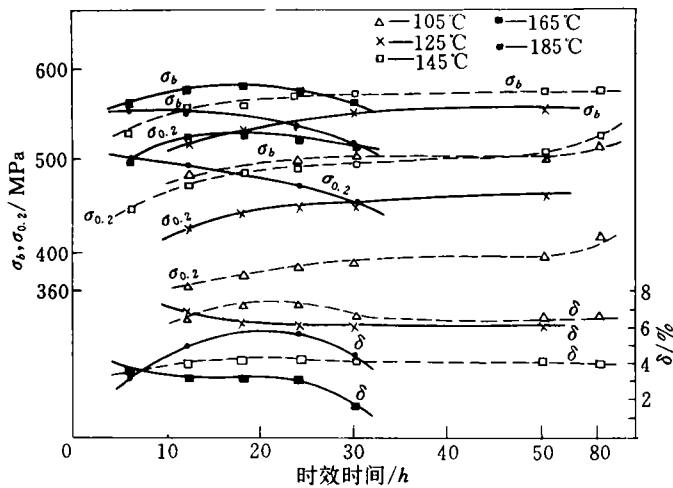


图 2 时效对合金室温拉伸性能的影响

表 1 为不同时效制度对应的力学性能。从时效曲线和表 1 的数据可见, 采用较低的时

效温度,但长时间保温可以获得较好的强度,而塑性却高于高温短时间达到峰值的时效状态。这说明低温长时间时效达到峰值状态的合金综合性能比在较高温度下较短时间内达到峰值状态的综合性能好。

表1 不同时效制度下合金的性能

时效制度	$\sigma_b$ / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\delta$ / %
165℃ / 18h	576	524	3.4
185℃ / 30h	520	450	4.5
125℃ / 48h	542	458	6.2

### 3.2 时效对相析出的影响

125℃, 12h 时效, 合金处于欠时效状态, 明场像观察不到  $\delta'$  相析出, 但存在  $[001]_{Al} + [001]_{\beta}$  衍射斑(图 3(a)), 表明基体已有  $\delta'$  相存在, 只是太小不易观察; 48h 时效后,  $\delta'$  相有所长大其直径约为 2~3nm(图 3(b))。此时合金具备良好的强度与塑性配合; 165℃, 18h 时效后,  $\delta'$  相在基体中大量析出, 此时  $\delta'$  相尺寸长大, 直径约为 8~10nm(图 3(c)), 合金强度达到最高值, 而塑性有所下降; 185℃ 30h 时效,  $\delta'$  相明显长大(15~20nm), 因  $\delta'$  粗化(图 3(d)), 合金强度下降。电子衍射没有发现含 Cu 和含 Mg 相。以上说明低温延缓了  $\delta'$  相的长大, 随  $\delta'$  的长大合金强度提高, 塑性下降。本研究中合金具有良好强度与塑性的  $\delta'$  的典型尺寸为 2~3nm, 因此通过控制  $\delta'$  尺寸是获得合理强度与塑性的有效途径。

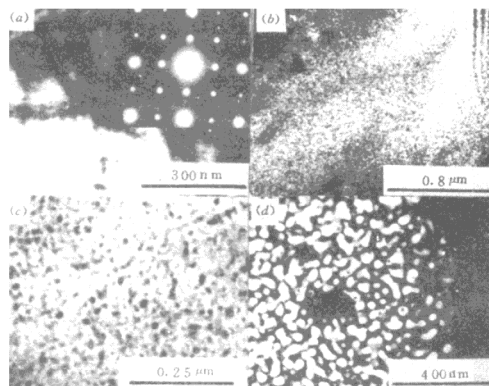


图3 不同时效条件下的  $\delta'$  相

(a) 125℃ / 12h 欠时效状态; (b) 125℃ / 48h 时效状态; (c) 165℃ / 18h 时效状态; (d) 185℃ / 30h 时效状态

图4表明晶内基体中存在球状的 FCC 结构亚稳  $Al_3Zr$  相,  $Al_3Zr$  相与  $\delta'$  相相比, 具有更高的强度, 不易被位错切过。它的存在可分散滑移, 减少平面滑移的局部化, 有利于

提高合金强度, 改善塑性。

### 3 讨 论

在铝锂系合金中, 普遍的观点认为亚稳态  $\delta'$  ( $\text{Al}_3\text{Li}$ ) 超点阵相的存在而引起平面滑移的局部化, 导致位错在晶界塞积, 是造成合金的低塑性和低断裂韧性的原因; 认为减弱平面滑移就可以改变低塑沿晶断裂。RSP(Rapid solidified powder) 铝锂合金除了  $\delta'$  ( $\text{Al}_3\text{Li}$ ) 相固有的特征引起合金的低塑性和低韧性外, 还有粉末颗粒界面问题。铝锂粉末的易氧化性致使合金中存在原始颗粒界 (PPB), 它是削弱颗粒结合强度的重要原因。除 PPB 是削弱粉末颗粒界面结合强度的因素外<sup>[2]</sup>, 粉末颗粒界面析出相也影响其结合强度。以往的研究没有给界面析出相以足够的重视。观察合金拉伸断口, 可见其上存在的沿粉末颗粒界面劈开的二次裂纹不仅与颗粒大小有关, 还与合金状态有关。粉末小, 比表面大, 二次裂纹严重, 这是 PPB 的作用。但在粉末尺寸相同的情况下, 比较合金粉末直接挤压断口和固溶处理后的断口, 合金粉末直接挤压的断口特征主要为小锥状体, 沿粉末界面劈开的二次裂纹不明显(5(a)), 而在 530℃ 固溶处理后, 二次裂纹明显可见(图 5(b))。说明固溶处理后的界面结合强度有所减弱。该合金的超塑性断口也发现, 加热温度低于 500℃ 时, 二次裂纹不明显。

观察挤压态和固溶处理两种样品的薄膜试样, 发现两种状态的粉末边界上都有大小不等, 形状不规则的小质点(图 6), 挤压态(图 6(a)) 的稀少, 固溶处理(图 6(b)) 的数量多, 质点间距很小。电子衍射表明, 质点主要为四方结构的  $\text{Al}_3\text{Zr}$  相。析出物与基体无共格关系, 一般在 400~500℃ 加热时析出<sup>[3-4]</sup>。在本合金中, 绝大多数稳态  $\text{Al}_3\text{Zr}$  分布于颗粒界面上。

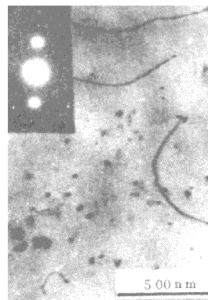


图 4 合金中的  $\text{Al}_3\text{Zr}$  相 [011]<sub>FCC</sub>  $\text{Al}_3\text{Zr}$

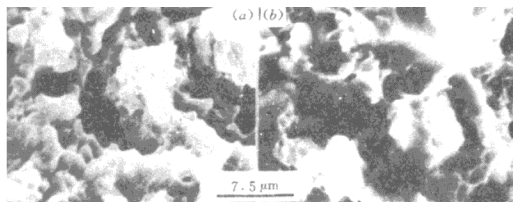


图 5 合金经过热处理和未经处理挤压状态的拉伸断口

(a) 未经处理挤压状; (b) 经 530℃ 固溶处理后

固溶处理后, 界面析出相数量显著增多, 新的相界面扩大, 大量空穴在界面聚集, 在

外力作用下, 界面很容易脱开, 说明改善合金塑性, 不仅要控制粉末表面氧化, 破碎氧化膜使合金致密化, 同时不得忽视界面析出相的形式和分布。

因此 I/M (Ingot Metallurgy) 铝锂合金存在其特殊性, 即合金性能更依赖于界面、晶内和晶界三者的搭配。若晶内强化效果过于明显, 界面就会起主导作用, 反之亦然。因此在考虑合金强化和韧化问题时, 应在界面强度与基体韧化具有良好配合的前提下, 恰当引入除  $\delta'$  相以外的强化相。

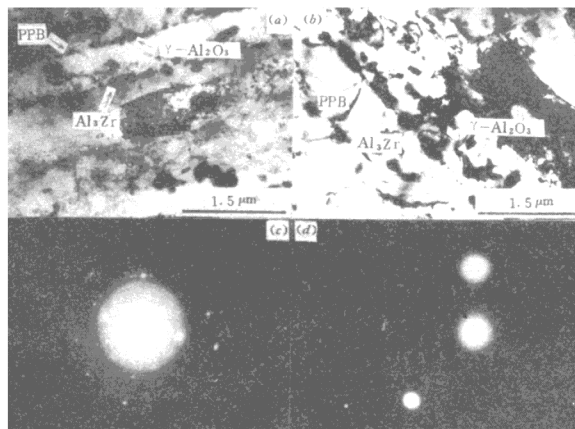


图6 粉末颗粒界面存在的氧化物和析出相  $\text{Al}_3\text{Zr}$

(a) 挤压态; (b) 固溶处理

#### 4 结论

RSPAl-3.2Li-1.2Mg-0.3Cu-0.2Zr 合金挤压棒采用 125℃ 48h 时效可以获得较好的拉伸性能 ( $\sigma_b = 542\text{MPa}$ ,  $\sigma_{0.2} = 457\text{MPa}$ ,  $\delta = 6.1\%$ )。合金在长时间低温时效获得的综合性能优于高温短时间达到峰值状态的性能。合金的主要强化相为  $\delta'$  ( $\text{Al}_3\text{Li}$ )、Mg、Cu 起固溶强化作用。合金强度与塑性的较好配合主要依赖于控制  $\delta'$  相尺寸与分布。Zr 形成两种  $\text{Al}_3\text{Zr}$  相。亚稳态  $\text{Al}_3\text{Zr}$  有助分散滑移, 改善塑性, 粉末颗粒界面存在的稳态  $\text{Al}_3\text{Zr}$  削弱界面结合强度。

#### 参考文献

- 1 Mahalingam K, Mahadev V, Liedl G L, Sander T H Jr. Precipitation behavior of  $\delta'$  in a binary Al-Li alloy. *Scripta Metall*, 1991; 25:2181-2185

- 2 Narayanan D H, Graham W H, Quist W E. Important considerations in the production of P / M aluminum–lithium alloys. In: Froce F H, Savage S J. eds. Proc Structure Metals by Rapid Solidification, Florida, 1986, ASM, 1987:321–336
- 3 Ryum N. Precipitation and recrystallization in an Al–0.5%Zr alloy. Acta Metall, 1969; 17:269–278
- 4 Gayle F W, Vandersande J B. Al<sub>3</sub>(Li, Zr) or  $\alpha'$  phase in Al–Li–Zr system. In: Baker C, Gregson P J, Harris S J, Peel C J. Eds. Proc of the third Inter aluminum –lithium conf, University of Ox ford, 1985, London: The institute of Metals, 1986: 376–384