

# 铝锂合金的时效研究

强俊 吴一雷 潘峰 潘明祥 朱德云

(北京航空材料研究所)

本文研究了铝锂合金(8090)时效过程中组织与性能之间的关系。190℃时效析出相的顺序可能是 $\alpha_{ss} \rightarrow \alpha + \delta' \rightarrow \alpha + \delta' + T_1 + S' \rightarrow \alpha + \delta' + T_1 + S' + \theta' + T_2$ 。当 $T_1$ 和 $S'$ 相析出时,强度和延伸率都提高,过时效后,由于 $\theta'$ 和 $T_2$ 相析出,性能下降。

## Investigation of an Al-Li Alloy Ageing Process

Qiang Jun Wu Yilei Pan Feng Pan Mingxiang Zhu Deyun

(Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

The relationship between microstructure and mechanical properties of a 8090 Al-Li alloy during ageing is investigated. It is found that the ageing sequence at 190℃ seems to be  $\alpha_{ss} \rightarrow \alpha + \delta' \rightarrow \alpha + \delta' + T_1 + S' \rightarrow \alpha + \delta' + T_1 + S' + \theta' + T_2$ . With the precipitation of  $T_1$  and  $S'$  phases the strength and elongation are both increased. When the alloy is overaged, the properties are reduced due to the precipitation of  $\theta'$  and  $T_2$  phases.

### 一、前言

铝锂合金由于加入了最轻的金属元素锂而具有密度低的突出优点。Li在铝中有较大的溶解度,且随温度变化有很大的固溶度变化,析出亚稳相 $\delta'$ ( $Al_3Li$ ),因此具有很好的沉淀强化作用。Li的加入还能提高铝的弹性模量。上面这些因素使Al-Li合金具有高的比强度、比刚度<sup>[1]</sup>,用它代替高强度铝合金制造零件可减重10~15%。另外,Al-Li合金在热处理、机械加工和连接工艺等方面均可使用铝合金的传统方法和工艺装备,同复合材料相比可节省大量的投资,所以Al-Li合金是一种极有前途的航空材料。近十多年来,世界上许多国家对Al-Li合金进行了大量的研究,并取得了很大进展,在一些飞机上进行了成功的试飞<sup>[2]</sup>,其中以美、英、法、苏等国最为活跃。目前发展比较成熟的有Al-Cu-Li系的2090,2091和Al-Li-Cu-Mg系的8090和8091等几个系列的合金<sup>[3]</sup>。

Al-Li合金的性能与热处理工艺有密切关系。目前国外对Al-Li合金正在研究一些新的热处理制度,使同一成分的合金根据需要采取不同的热处理,可以得到较高的强度,也可以得到较高的延性和韧性

(以牺牲强度为代价)<sup>[4]</sup>。为了解Al-Li合金在时效过程中力学性能的变化以及产生这种变化的微观组织原因,以便选择合理的热处理制度,我们对Al-Li-Cu-Mg-Zr合金的时效过程进行了初步研究。研究了三种时效温度下硬度随时间的变化,并研究了在190℃时效时合金力学性能随时效时间的变化,另外对合金力学性能与微观组织之间的关系进行了初步探讨。

### 二、材料及试验方法

试验所用的合金成分为Al-2.25Li-1.47Cu-1.24Mg-0.10Zr,铸锭经均匀化处理后在400吨挤压机上挤压成 $\phi 12$ mm的棒材。经530℃固溶处理后在不同条件下时效。处理好的材料制成 $\phi 12 \times 4$ mm的试样,经磨平抛光后进行硬度测量。拉伸试验所用的试样标距部分为 $\phi 5 \times 25$ mm。微观组织分析是在H-800型透射电镜上进行的。

### 三、试验结果

#### 1. 不同温度下硬度随时效时间的变化

为了选择合适的时效温度,首先对Al-Li合金在170℃、190℃和210℃三种温度下HV随时

效时间的变化进行了测试, 结果如图 1 所示。

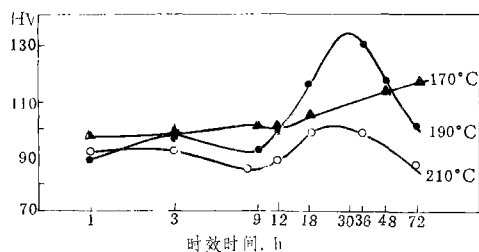


图 1 不同温度下 HV 随时效时间的变化

从图 1 可以看出, 对所研究的合金, 170℃时效时, HV 随时间的延长而逐渐增大, 到 72 小时仍未达到峰值。190℃时效, HV 在 24 小时附近达到峰值, 随后开始下降。210℃时效, 约 20 小时就达到了峰值, 但其硬度值在 170℃和 190℃时效曲线的下方, 说明此时效温度是太高了。虽然 170℃时效, 再延长时效时间有可能得到更高的硬度, 但从经济性考虑, 选 190℃时效比较合理。

## 2. 时效过程中力学性能的变化

根据图 1 得到的硬度试验结果, 研究了在 190℃时效时合金的室温拉伸强度  $\sigma_b$ 、屈服强度  $\sigma_{0.2}$  和延伸率  $\delta$  随时效时间的变化, 其结果如表 1 和图 2 所示。

从图 2 可以看出, 合金的  $\sigma_b$  和  $\sigma_{0.2}$  随时效时间的延长先是不断地上升, 至 20 小时左右达到峰值, 此时的拉伸强度达 505MPa, 屈服强度达 470MPa。20 小时以后,  $\sigma_b$  和  $\sigma_{0.2}$  开始下降, 说明已经过时效。合金的延伸率, 开始随时效时间的延长不断下降, 到 9 小时开始回升。在 20 小时左右, 即合金强度达到峰值时, 延伸率也回升到最高 (5.6%)。过时效后又开始下降, 从实验结果看, 此合金在 190℃时

效达到最高强度的时间为 20~24 小时。且这时有较好的延伸率与之配合。

表 1 190℃时效不同时间的力学性能

时效时间, h	1	3	9	14	18	30	48
$\sigma_b$ MPa	410.0	437.3	461.3	492.3	504.7	466.0	474.7
$\sigma_{0.2}$ MPa	347.3	396.0	433.7	465.0	472.7	429.7	434.0
$\delta, \%$	9.4	5.0	3.4	4.8	5.6	5.2	4.0

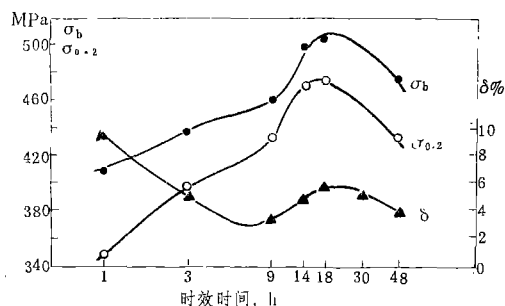


图 2 190℃时效,  $\sigma_b$ 、 $\sigma_{0.2}$ 、 $\delta$  随时效时间的变化

## 3. 时效过程中合金微观组织的变化

Al-Li 合金是沉淀强化型合金。除了固溶强化的因素以外, 主要靠时效过程中从过饱和固溶体中析出的沉淀相来强化。主要的强化相是  $\delta'$  ( $\text{Al}_3\text{Li}$ ), 另外还有  $S'$  ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) 相、 $T_1$  ( $\text{Al}_2\text{CuLi}$ ) 相和  $\theta'$  ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) 相。图 3 是 190℃时效不同时间后析出的  $\delta'$  相的透射电镜照片。 $\delta'$  相是一种与  $\alpha$ -Al 基体共格的亚稳相。从图中可以看出,  $\delta'$  相是以弥散质点的形式在晶内均匀析出的。随着时间的增长,  $\delta'$  相尺寸不断长大, 数量不断增多。

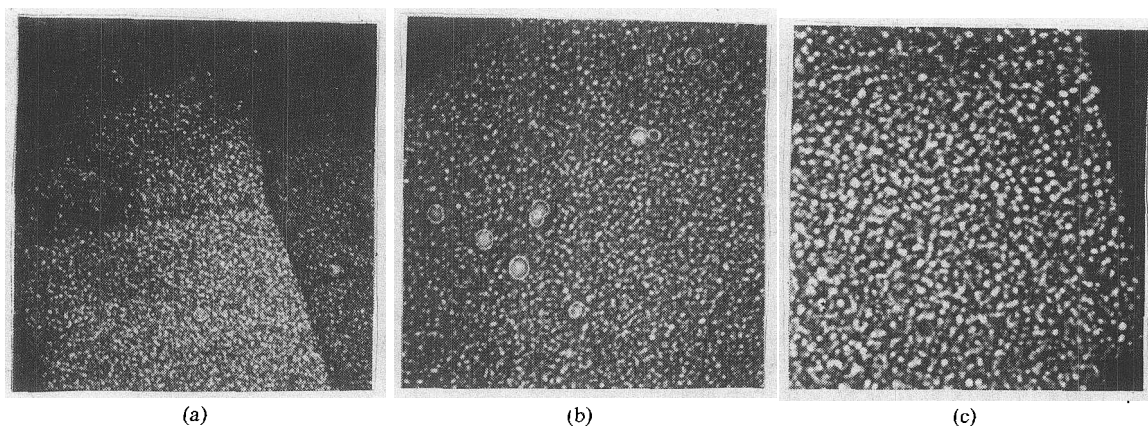


图 3 190℃时效合金中析出的  $\delta'$  相 40000× 时效时间为: (a)1 小时; (b)3 小时; (c)14 小时

从时效 9 小时开始观察到有  $T_1$  相的析出,  $T_1$  相是片状交叉分布的, 如图 4 所示。这时也偶尔观察到  $S'$  相, 但很稀少、细小。时效到 30 小时,  $S'$  相已长得较大, 如图 5 所示。 $T_1$  相和  $S'$  相的出现且逐渐增多, 从时间对应关系看, 恰与强度曲线的迅速上升和

延伸率曲线从最初的下降趋势转为上升相对应。

时效 48 小时的样品, 发现有  $\theta'$  ( $Al_2Cu$ ) 相。同时在晶界和晶粒内部都观察到有相当粗大的  $T_2$  ( $Al_6CuAl_3$ ) 相出现 (见图 6), 此时合金的强度与延伸率已明显下降。

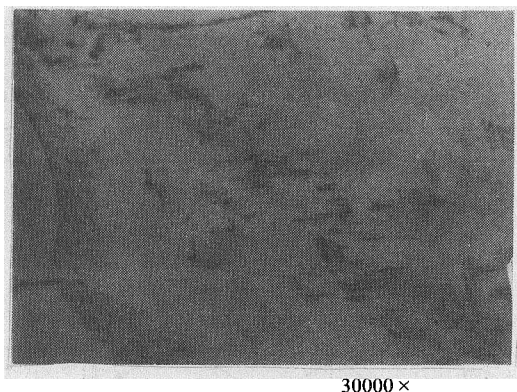


图 4 190°C 时效 9 小时观察到的  $T_1$  相

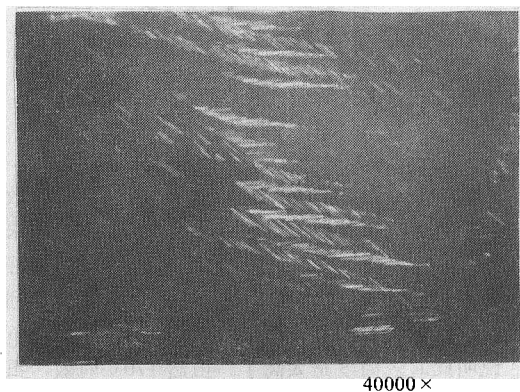
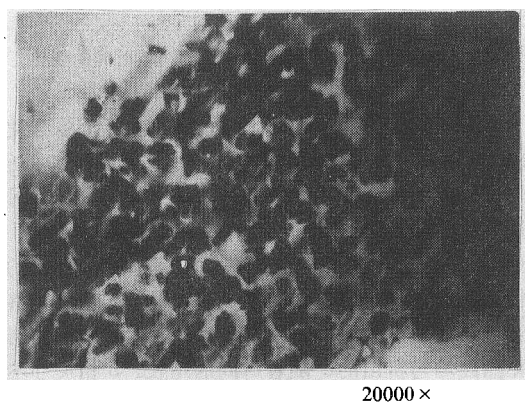
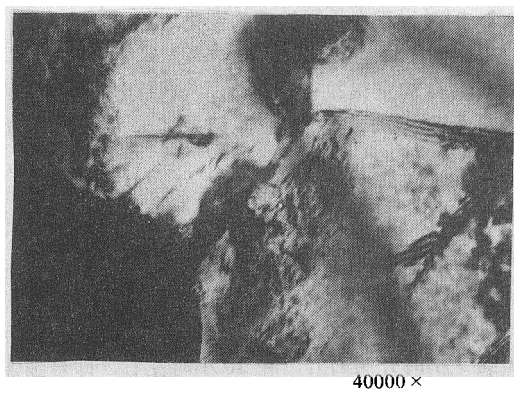


图 5 190°C 时效 30 小时观察到的  $S'$  相



(a)晶内

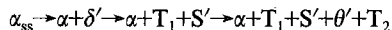


(b)晶界

图 6 时效 48 小时观察到的  $T_2$  相

#### 四、讨 论

从观察到的各个相析出的先后次序可以认为合金在时效过程中的相变过程为:



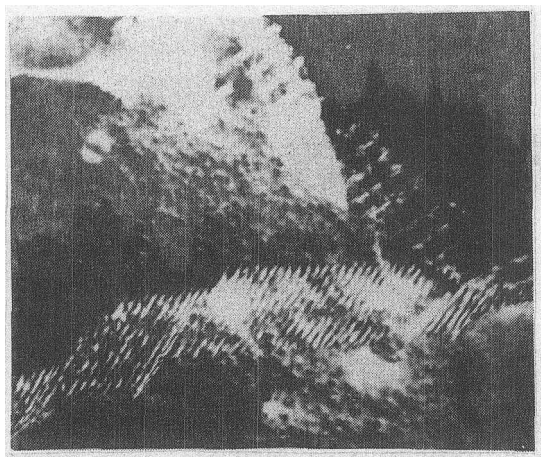
$\delta'$  相的强化作用主要是靠位错运动剪切粒子产生的阻力。根据对 Al-Li 二元合金的分析, 位错剪切  $\delta'$  粒子时, 其临界剪切应力增量  $\Delta\tau_{CRSS}$  与形成的反相畴有关, 其关系为<sup>(1)</sup>:

$$\Delta\tau_{CRSS} \propto \gamma_{APS}^{3/2} r^{1/2} f^{1/2}$$

式中  $\gamma_{APS}$  为粒子反相畴界面能,  $r$  为粒子的平均半径,  $f$  为粒子的体积百分数。从式中可看出,  $\Delta\tau_{CRSS}$  随粒子的半径和体积百分数的增加而增加。

时效过程中观察到的均匀分布的  $\delta'$  相, 其尺寸和数量随时效时间的延长不断增加, 正好与图 2 中  $\sigma_b$ 、 $\sigma_{0.2}$  的上升段相对应, 这与上面的分析是一致的, 从而也说明  $\delta'$  相在合金强化中起了主要的作用。

与此同时延伸率在不断下降, 这可能是由于位错剪切  $\delta'$  粒子以位错对的形式进行, 导致滑移面的弱化, 使变形集中在某些易滑移带, 位错便在晶界处堆积, 产生很大的应力集中, 使 Al-Li 合金呈现出低塑性的沿晶断裂<sup>(5)</sup>。这就是时效 9 小时前延伸率不断下降的原因。图 7 是在透射电镜下观察到的位错列塞积群。



50000×

图7 时效3小时后观察到的位错列塞积群

值得注意的是,时效9小时后,强度开始较快地上升,而延伸率不但不再下降,反而开始回升(见图2)。这一趋势与一般铝合金不同。其原因可能与 $T_1$ 相和 $S'$ 相析出有关,因为这时开始观察到有 $T_1$ 相和 $S'$ 相出现。说明 $T_1$ 和 $S'$ 相不但有较好的强化作用,而且还能有效地改善塑性。有人观察到 $S'$ 相和 $T_1$ 相对位错运动有阻碍作用,它们能使切割 $\delta'$ 相的共面滑移变成交叉滑移,使合金的塑性变形更加均匀,消除了明显的集中变形,因而延伸率得以提高。基于这种分析和观察,一般对Al-Li合金在固溶处理后采取一定的预变形(拉伸或压缩),以促使随后时效过程中 $S_1$ 相和 $T_1$ 相的均匀析出,提高合金的强度和塑性<sup>[6]</sup>。

时效20小时以后强度开始下降,合金已开始过时效。这可能与 $\delta'$ 、 $S'$ 、 $T_1$ 等相变得粗大有关。同时开始有 $T_2$ 相析出,且随着时间的延长 $T_2$ 相数量不断增加、尺寸不断增大。合金过时效后,延伸率逐渐下

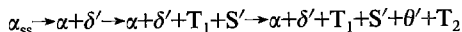
降,这可能与 $T_2$ 相的析出有密切关系。在较高的温度下长时间时效会析出 $T_2$ 相,该相对合金性能产生不利影响。在时效前期未观察到 $\theta'$ 相,只是在48小时发现有较粗大的 $\theta'$ 相,这时合金性能已明显下降。

## 五、结 论

1. Al-Li-Cu-Mg-Zr合金在170、190和210℃三种温度下时效,通过硬度随时间变化的研究表明,为了在较短时间内得到最好的力学性能,在190℃时效比较合适。

2. 对所研究的合金,190℃的峰值时效时间为20~24小时,这时合金具有最高的强度和延伸率。

3. 合金在190℃时效析出相的顺序为:



4. 合金时效初期,随强化相 $\delta'$ 粒子尺寸的不断增大,强度提高,延伸率下降。随着 $T_1$ 相和 $S'$ 相的析出,强度增加速率迅速增大,延伸率开始回升。过时效后强度、延伸率下降,与 $T_2$ 相的析出有关。

## 参考文献

- (1) Welpmann K., Peters M., and Sanders T.H., Aluminium, Vol.60 (1984), No10, PP641~646.
- (2) 强俊, 航空制造工程, 1987, No12
- (3) Champier G., Dubost B., Miannay D., 4th International Aluminium-Lithium Conference, 1987, France.
- (4) Baker C., Gregson P.J., Harris S.J., Peel C.J., Aluminium Lithium Alloys III, The Institute of Metals, 1986.
- (5) Sanders T.H., Stark E.A., Acta Met, 30 (1982), PP927~939.
- (6) Miller W.S., White J., 等。见参考文献3, PP151~162.

## 《航空制造工程手册》编写工作正在进行

《航空制造工程手册》总编委会筹备会于1989年4月25日在北京怀柔闭幕。到会代表有航空工业部机关和厂所院校的专家、学者共78名。何文治副部长到会听取了汇报并对手册编写的总体设计、写作目的、作用和使用对象等方面做了具体论述,为手册的编写奠定了基础。

《航空制造工程手册》的编写是我国航空工业发展的必然结果,是以航空为本、航空科研生产发展和新机研制的需要。它可以把我国航空工业三十年来制造技术的实践经验进行科学化、理性化、系统化的总结,作为一笔巨大的技术财富留给后人,为航空工业的发展做出贡献。编写工作已经得到航空工业各界人士的关注。

该书总编主任由何文治副部长亲自担任。经研究,手册拟分为三十个分册分批次编写出版。各分册的主编和作者将由我部各行业有造诣的技术专家担任,以便将他们多年积累的经验和数据汇集到手册中去,使之具有实用价值和指导作用。手册的编写也得到航空工业主机厂和辅机厂领导者的普遍支持和赞助。目前已筹集了一定数量的经费。各行业的工程技术人员开始为编写手册搜集资料,可以相信,这一工作必能取得成功。

(科技处供稿)