

双级时效对快凝 Al-Li 合金组织 和性能的影响¹⁾

金头男 尹志民 张新明 邓俊彦

(中南工业大学)

摘 要

研究了双级时效工艺对一种快速凝固 Al-Li 合金显微组织和力学性能的影响。结果表明, 固溶后进行 170 °C、4 h 预时效和 190 °C、18 h 最终时效处理的 Al-Li 合金, 其塑性明显改善; 基体中形成大量粒度适宜的复合沉淀相粒子 ($\text{Al}_3\text{Li} / \text{Al}_3(\text{Li}, \text{Zr})$), 晶界上 $\delta'(\text{Al}_3\text{Li})$ 无沉淀带 (PFZ) 的窄化, 以及较多数量的 s' 相 (Al_2CuMg) 分散沉淀, 是这种合金的塑性得以改善的主要原因。

关键词: Al-Li 合金 快速凝固 双级时效 显微组织 力学性能

在一般情况下, 具有较高强度的 Al-Li 合金, 其塑性很低。而用熔铸法制备的 Al-Li 合金进行固溶处理后, 可用预冷变形-双级时效复合工艺处理大幅度地改善其塑韧性^[1-3]。但快速凝固制备的 Al-Li 合金, 一般只用来制作形状复杂的模锻件和挤压制品, 因而很难实施上述形变热处理。为了改善这类合金的塑韧性, Kim 等人^[4]曾做过一些研究, 他们认为双级时效有益于改善合金的塑韧性, 并指出塑韧性的改善与合金中出现较多的复合沉淀粒子 ($\text{Al}_3\text{Li} / \text{Al}_3(\text{Li}, \text{Zr})$) 有关。本工作旨在研究双级时效工艺对一种采用多级快速凝固技术制备的 Al-Li-Cu-Mg-Zr 合金挤压材显微组织和力学性能的影响, 探讨使这种合金获得良好塑性的显微组织模式, 并找出相应的时效处理制度。

1 材料和实验方法

用多级快速凝固技术制成片状合金粉末。再经冷压, 470 °C 真空脱气—真空热压, 400

°C 二次挤压制成棒材, 其化学成分 (wt.-%) 如下:

Li	Cu	Mg	Zr	Fe	Si	Al
2.52	1.60	1.22	0.20	0.12	0.80	余量

其中 Fe、Si 为杂质元素。合金的固溶处理在氩气保护下进行。525 °C, 40 min, 冷水淬。为了研究时效制度对合金组织和性能的影响, 对试样分别进行了 170 °C 和 190 °C 不同时间的单级时效, 以及 170 °C, 4 h 预时效后, 再进行 190 °C, 2~30 h 时效的双级时效处理。

拉伸试验是用标距为 25 mm 的标准短试样在 Instron 材料试验机上完成的, 拉伸速率为 1 mm/min。透射电镜样品取自拉伸试样的夹头, 用 H-800 电镜对不同处理态合金的显微组织进行了详细的观察、分析和统计。

2 实验结果

2.1 力学性能

固溶及 190 °C 单级时效态合金的室温拉伸性能列于表 1。它表明, 单级时效可使合金强

¹⁾ 本课题由 863 高技术委员会资助; 本文于 1992 年 1 月 23 日收到

度成倍增高,塑性大大降低;与欠时效和峰值时效态相比,过时效态合金的塑性有所回升,强度有所下降。经 170 ℃, 4 h 预时效,再进行 190 ℃ 不同时间时效处理的合金,其力学性能随第二级时效时间的变化示于图 1。可见,170 ℃、4 h 预时效和 190 ℃、2 h 二级时效处理的合金强度最高且接近单级峰值时效合金的强度值;之后随第二级时效时间的延长,强度单调下降,塑性则先是递增,在 18 h 左右达到最高(延伸率为 8.0%),随后又逐渐下降。和上述单级过时效相比,170 ℃、4 h 预时效,190 ℃、18 h 第二级时效处理,在保持同等强度的同时,显著提高了合金的塑性。

表 1 不同处理态合金的室温拉伸性能

处 理 工 艺	$\delta_{0.2}$ / MPa	δ_b / MPa	δ / %
固 溶 处 理	236.4	365.7	12.8
190 ℃, 4 h 欠时效	455.9	527.5	5.93
190 ℃, 6 h 峰值时效	503.4	559.9	5.41
190 ℃, 20 h 过时效	450.1	510.2	6.36

2.2 显微组织

固溶及不同时效处理态合金的显微组织示于图 2~5。固溶态合金中除少量弥散的 Al_3Zr 质点外(图 2), 没有发现其它第二相;而在时效态合金中,都不同程度地(指大小,分布等)析出球形有序强化相 δ' (Al_3Li)和片状第二强化相 S' (Al_2CuMg)。比较 170 ℃ 和 190 ℃ 单级时效合金的显微组织(图 3 和图 4)可见,单就 δ' 相而言,前者比后者析出慢;但 170 ℃ 却有利于 S' 相的沉淀。合金在 190 ℃ 单级时效时,6 h 后 S' 相开始析出(图 4 (b)),而在 170 ℃ 时效时,仅 4 h 亚晶界上就已有 S' 相沉淀(图 3 (b))。与 190 ℃ 单级时效合金相比,经 170 ℃, 4 h 预时效,再进行 190 ℃ 第二级时效的合金(图 5),在总的时效时间相近的前提下,除了 S' 相的析出数量多以外,其基体中还形成了大量的、均匀分布的鱼眼状复合沉淀相粒子(中心为 $\text{Al}_3(\text{Li}, \text{Zr})$, 周围被 Al_3Li 相包围^[5,6]),而且晶界区 δ' 无沉淀带(PFZ)的宽度也比前者的窄。实际上,复合沉淀粒子在 170 ℃, 4 h 时效的合金中就已大量形成,见图 3

(a),只是由于尺寸太小,衬度弱,不易观察到。为便于比较,表 2 中统计归纳出不同时效处理态合金中主要的显微组织特征。

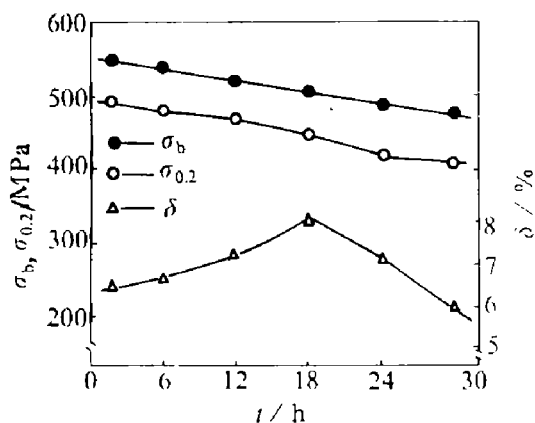


图 1 合金经 170 ℃ 4 h 预时效后,再进行 190 ℃ 的时效处理,其力学性能随第二级时效时间的变化

表 2 不同时效处理合金中的显微组织特征对照

时效制度	δ' 相平均粒度 / nm	PFZ 半宽度 / nm	复合粒子相对数量	S' 相的相对数量
单 级				
190 ℃, 6 h	15	47	少	很少
时 效				
190 ℃, 20 h	20	84	少	少
190 ℃, 6 h				
190 ℃, 2 h	14	38	多	较多
预时效				
190 ℃, 18 h	19	65	多	多
以 后				
190 ℃, 30 h	23	91	多	多

3 讨论

3.1 双级时效对复合沉淀相形成及 PFZ 宽度的影响

目前,关于复合沉淀相形成的机制大都建立在 δ' 相沿弥散的 Al_3Zr 质点不均匀沉淀的基础上。由于 Al_3Zr 和 Al_3Li 结构上的相似性,这种先前存在的质点应该是 δ' 相沉淀的有利基底,那么,最终复合粒子的数量和分布似应取决于时效前 Al_3Zr 质点的数量和分布状态。但是,本文结果表明,固溶后合金中存在的 Al_3Zr 质点数远少于时效态合金中复合粒子的数量(比较图 2(b)和 4(c)),而且选择不同的时效温度,复合粒子的形成也表现出很大差异,说明形成复合粒子的核心不只是 Al_3Zr 质点。Kim 等人^[4]指出,在一定温度进行时效时, Li 和 Zr 原子团的某种扩散对复合相的形成起

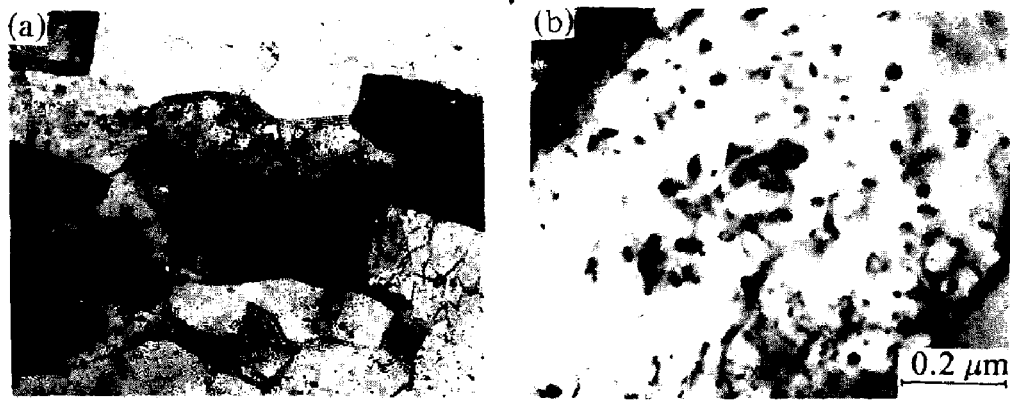


图2 固溶处理合金的显微组织

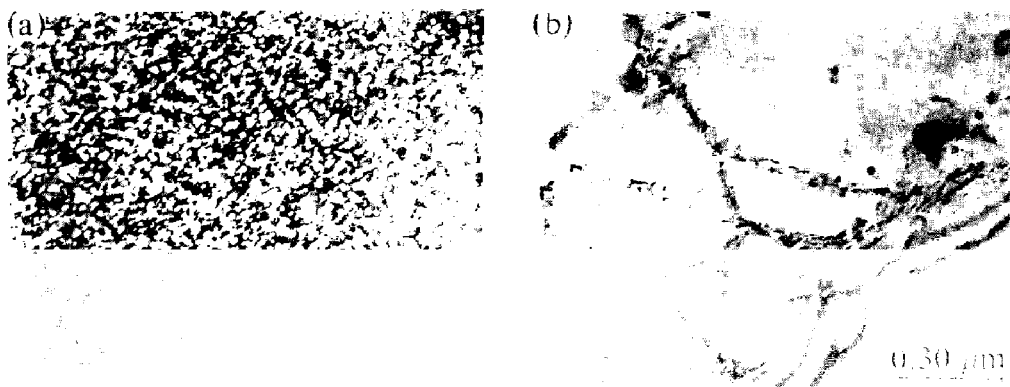
(a)—晶界和基体; (b)— Al_3Zr 粒子和位错环

图3 170 °C、4 h 时效合金的显微组织

(a)—基体中的析出物; (b)—晶界上的 S' 相(Al_2CuMg)

着重要作用。这种作用机制目前尚不清楚,有可能是合金固溶处理后,过饱和固溶体中存在着 Zr 原子的聚集团,在适宜的温度(如 170 °C)时效时,将促进 Zr 原子团与 Li 的交互作用,生成 $\text{Al}_3(\text{Li},\text{Zr})$ 型初级核心,随着时效时间的延长和时效温度的提高(双级时效),形成所观察到的 $\text{Al}_3\text{Li}/\text{Al}_3(\text{Li},\text{Zr})$ 复合相粒子。从本文结果看,合金经 170 °C、4 h 预时效、190 °C 第二级时效处理,其复合粒子的数目的确增多,然而,尽管显微组织的结果是肯定的,由于笔者缺乏有关 Al-Li 合金的热力学数据,目前尚难以作出更确切的解释。

此外,本文作者认为,有 Zr 原子参与沉淀的 δ' 相(即复合粒子)比直接单纯析出的 δ' 粒子可能更稳定。双级时效时,由于在预时效阶段形成了较多稳定的复合粒子,使晶界区

PFZ 宽化比较难;而在 190 °C 单级时效过程中,大多数 δ' 粒子沉淀没有 Zr 参与,因而随时效时间的延长,由于晶界是 Li 原子的陷阱(形成富 Li 的平衡相 AlLi),容易使早期沿晶界附近沉淀的亚稳 δ' 相失掉 Li 而溶解,导致 PFZ 宽化严重。

3.2 双级时效时 $\delta'(\text{Al}_2\text{CuMg})$ 相沉淀的影响

快速凝固 Al-Li 合金中,除了晶粒细小(约为 1.5~2.0 μm)外,还存在大量的有利于 S' 相形核沉淀的亚晶界、位错等亚结构,因此,无需用形变热处理就可获得较多的 S' 相。但 S' 相的沉淀一般存在一个孕育期,其长短与所采用的时效制度有关。合金时效时,随着 δ' 相的析出长大,被 Li 原子束缚的空位逐渐释放出来,这些空位在向表面、晶界和位错等缺陷处扩散湮没的过程中,伴随着和

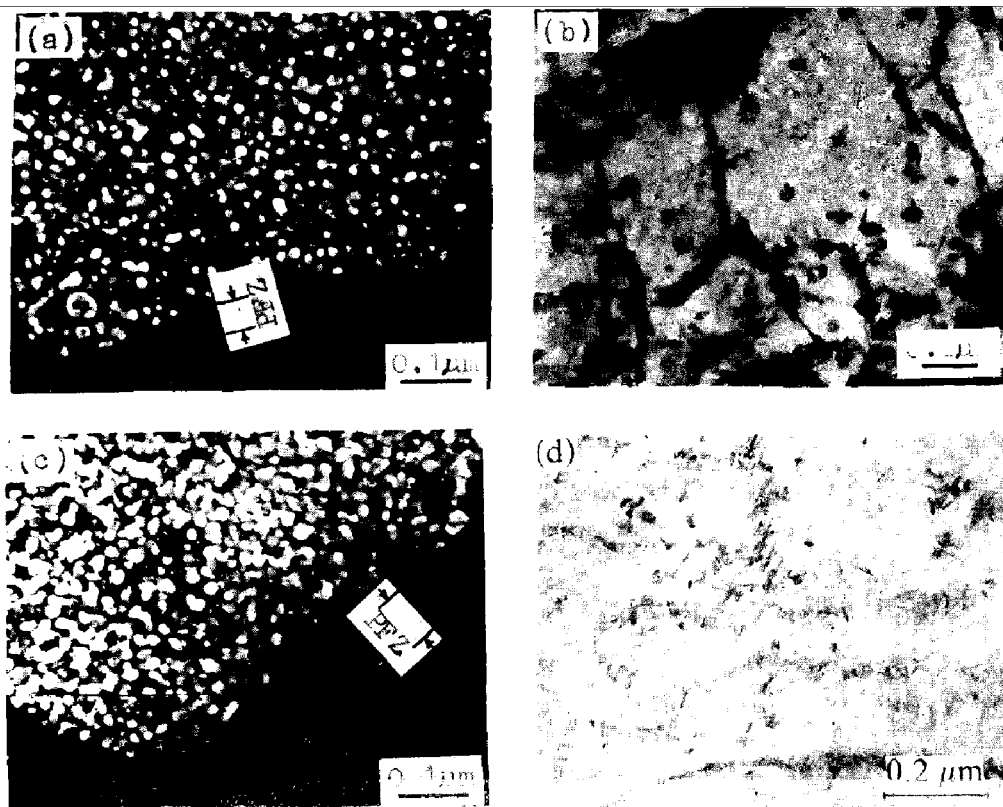


图4 190 °C 不同时间时效合金的沉淀特征

(a),(b)—6 h; (c),(d)—20 h

Cu、Mg 原子的交互作用而加速这些原子的扩散过程,使晶内缺陷附近富含 Cu、Mg 原子,从而促进 S'相析出^[7]。双级时效时,由于预时效温度较低,使自由空位扩散速度放慢,相应地等于增加了空位对 Cu、Mg 原子的“运载”能力,增大了 S'相析出的驱动力,从而促使 S'相在时效早期就开始析出(图 3 (b))。因此,采用双级时效工艺,可以缩短 S'相析出的孕育期,有利于 S'相的脱落沉淀。

3.3 双级时效对合金塑性的改善

一般认为,δ'相的粒度决定时效态 Al-Li 合金变形过程中位错与 δ'粒子的交互作用方式^[8]。单级过时效态合金受载变形时,一方面,由于 δ'粒子已粗化(大于 15 nm),位错与 δ'粒子的作用方式由切割转为绕过,而且还有第二强化相 S'的分散沉淀,共面滑移的作用将被减弱,使变形趋于均匀,合金的塑性得以提高;另一方面,由于晶界出现较宽的无析出

带,以及伴生的块状平衡析出相,变形择优在较软的无沉淀带内发生,应变集中的结果极易在平衡相周围形成裂纹源,导致合金低塑性沿无沉淀带断裂。上述两方面相悖因素综合影响的结果,表现为单级过时效态合金的塑性虽有所回升,但仍较低。由表 2 可知,适当的双级时效处理(170 °C、4 h 预时效,190 °C、18 h 第二级时效),不仅可以保证 δ'相粒度与相应的单级时效合金(190 °C、20 h 时效)的 δ'粒子相同,而且双级时效合金中 S'相沉淀的数量明显增多,晶界区无沉淀带的宽度更窄。特别是双级时效能促使大量均匀分布的复合粒子形成,这种粒子因其中心硬度高和界面能大^[9],位错难以切割,所以,也具有减弱位错共面滑移的作用。综上所述,可以看出,正是由于双级时效促进了对合金塑性有利的组织结构因素的形成,抑制了不利因素的发展,才使 Al-Li 合金的塑性得以显著改善。

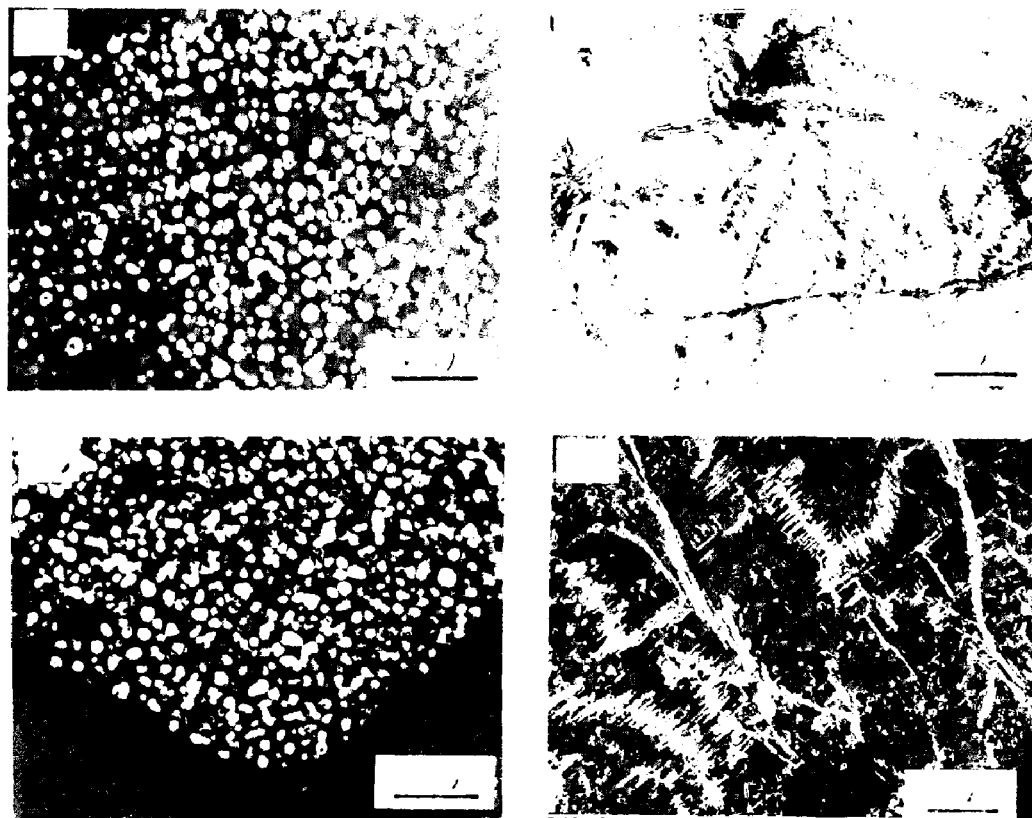


图5 170 °C, 4 h 预时效后进行 190 °C 第二级时效, 不同时效时间处理合金的显微组织

(a),(b)—2 h; (c),(d)—18 h

致 谢

潘青林, 王云, 黄均声, 周多三同志参加了部分实验工作, 作者在此表示感谢。

参考文献

- 1 Sinko R J *et al.* Al-Li V, MGEP, 1989, 1: 375.
- 2 White J *et al.* Al-Li IV, Paris, C3-425, 1987
- 3 尹志民等. 金属学报, 1991, 27(2), A130.
- 4 Kim N J *et al.* Al-Li III, London, 1985, 78.
- 5 Gayle F W and Vander J B. Scripta Met. 1984, 18: 473.
- 6 Tatsuo Sato *et al.* Scripta Met, 1989, 23: 447.
- 7 郑子樵等. 中南矿冶学院学报, 1991, 22(6): 660.
- 8 Guyot P. Proc. CBECIMAT VI, Rio de Janeiro, Brazil. Puc / RJ, 1984, 387.

4 结论

(1) 双级时效能显著提高快速凝固 Al-Li 合金的塑性, 在本实验条件下, 合金最佳的双级时效制度是: 170 °C、4 h 预时效, 190 °C、18 h 第二级时效。

(2) 基体中均匀分布着大量粒度适宜的复合沉淀粒子($\text{Al}_3\text{Li} / \text{Al}_3(\text{Li}, \text{Zr})$), 无沉淀带(PFZ)的窄化, 以及较多数量的 S'相(Al_2CuMg)沿亚结构分散沉淀, 是这种合金塑性得以改善的主要原因。