

LY12 铝合金 FTMT 强化工艺的探讨^①

胡治流

(广西大学矿冶系, 南宁 530004)

曹乃光

(中南工业大学材料科学与工程系, 长沙 410083)

沈 燕

(广西大学科技处, 南宁 530004)

摘 要 研究了 LY12 铝合金最终形变热处理(FTMT)中预时效和冷变形工艺参数对合金机械性能的影响。结果表明: 预时效为适当的欠时效时 FTMT 强化效果好; 对 LY12 铝合金, 预时效以 100℃ 时效 5~6h 为佳; 冷变形程度以 20%~30% 为好。根据 TEM 观察结果, 提出了铝合金最终形变热处理强化工艺优化的原则。对塑性变形防止铝合金回归的机制进行了探讨。

关键词 最终形变热处理(FTMT) 铝合金 预时效 冷变形 回归

铝合金的最终形变热处理(FTMT)旨在通过塑性变形与热处理的有机结合, 充分合理地利用合金的加工硬化和沉淀硬化, 使合金获得更高的强度且保持良好的塑性、韧性和抗应力腐蚀性能^[1-3]。

十多年来, 铝合金最终形变热处理的研究有较大的进展, 发现了“固溶淬火+预时效+变形+终时效”的 FTMT 工艺, 最终强化效果比未进行预时效的要好^[1-3]。但对 FTMT 中预时效和变形的工艺参数的研究还不够深入, 难以优选。本文的目的在于通过进一步研究 FTMT 中预时效和冷变形工艺参数对 LY12 铝合金机械性能和显微组织的影响, 以优化 FTMT 工艺。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本试验材料为西南铝加工厂提供的厚度为 4.0 mm, 具有工艺包铝层的 LY12 铝合金板材, 其化学成分(wt.-%)分别为: 4.72Cu; 1.70Mg; 0.55Mn; Fe≤0.37; Si≤0.17; Zn≤0.2; Ni≤0.05; 余为 Al。

1.2 试验方案

在 FTMT 试验中, 方案如下: (1) 预时效程度的影响, 比较 190℃ 下欠时效(时效 4h)、峰值时效(时效 12h)、过时效(时效 16h)^[4]三种典型时效状态的影响; (2) 预时效温度的优选; (3) 冷变形程度的影响。试验具体工艺参数见表 1, 终时效工艺参数根据作者已做的试验选取 150℃, 6h。

1.3 试验过程

全部试件先经 498℃ 硝盐槽中保温 15 min 后水淬, 随后分组按表 1 的 FTMT 工艺进行处理。100℃ 的人工时效在沸水槽中进行, 其余人工时效在电热鼓风干燥箱中进行, 10%、20% 和 30% 的冷轧相应道次分别为 2、4 和 6。

拉伸试样按长试样标准($l_0 = 11.3\sqrt{F_0}$), 表 1 所列的机械性能数据均为同一状态至少三个试样的相应平均值。最后对优选的工艺方案处理的合金进行透射电镜显微组织观察。试样制备: 先用 40%HF+60%H₂O+5 g/L NiCl₂ 溶液把试样预减薄至 100 μm 左右, 然后在 0~10℃ 下用 10%高氯酸+90%乙醇电解液进行双喷电解抛光减薄, 至薄膜中心刚穿孔即取出, 在 H-800 分析电镜上进行透射观察, 加速

① 收稿日期: 1994-04-12; 修回日期: 1994-08-28

电压为 175 或 200 kV。

表 1 FTMT 对 LY12 铝合金机械性能的影响

组 号	FTMT 工艺参数*		σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ_{10} %
	预 时 效	冷 变 形			
I	1	190 °C, 4 h	500	—	6
	2	190 °C, 12 h 30%CR	430	—	6
	3	190 °C, 16 h	400	—	6
II	1	室温, 8 h	545	455	9
	2	100 °C, 6 h 30%CR	560	470	8
	3	150 °C, 6 h	550	460	8
III	1	10%CR	495	380	11
	2	100 °C, 6 h 20%CR	535	445	8
	3	30%CR	560	470	8

* 终时效工艺参数均为: 150 °C, 6 h; CR—冷轧

2 试验结果及讨论

2.1 预时效程度的影响

比较表 1 中 I 组的结果, 可见在冷变形的 FTMT 中, 最终强化效果以欠时效状态的预时效最好, 峰值预时效次之, 过时效状态预时效效果最差。

欠时效状态的预时效, 使“固溶淬火+预时效+冷变形+终时效”的 FTMT 强化效果好。我们认为主要是欠时效能为 FTMT 中的变形和终时效提供较好的组织状态。适当的欠时效能使合金生成一定数量的、均匀的预沉淀物, 与变形引入的大量位错成为终时效时均匀形核与位错上非自发形核的有利位置, 促进终时效的沉淀析出, 极大地增加了总析出粒子数目及弥散度, 使合金的沉淀强化得到加强。相对而言, 未进行预时效的 FTMT 工艺, 无法为变形后的终时效提供均匀形核核心, 不利于沉淀析出相的均匀弥散, 故强化效果较差。

与峰值时效及过时效相比, 欠时效时过饱和溶质原子浓度较高, 而在位错上的沉淀随溶质原子过饱和度的增加而增加, 变形引入的高密度位错, 此时能使析出粒子变多、变细^[5], 充分发挥了变形对沉淀组织的改善作用。预时效为峰值时效时合金已析出较多的不均匀分布的 S' 相^[6], 随后的变形难以消除这种不均匀

分布, 且因溶质原子过饱和度较低, 变形和终时效中能析出的细小沉淀粒子少, 因而强化效果差。预时效为过时效状态, 析出物粗化, 过饱和溶质原子贫乏, 随后变形和终时效时几乎无沉淀析出, 变形也难以改变粗大不均匀的析出相组织, 故强化效果更差。当然, 过饱和溶质原子浓度应适当, 过高时(如无预时效的 FTMT 工艺), 沉淀相很容易在位错和晶界上非均匀析出粗化, 也不利于强化。

综上所述, FTMT 的预时效应选欠时效状态, 才能使 FTMT 达到好的强化效果。为探讨预时效工艺参数的优化, 继续考察三种不同温度的欠时效, 即室温, 8 h; 100 °C, 6 h 和 150 °C, 6 h, 结果见表 1。

2.2 预时效温度的优选

由表 1 中 II 组的结果, 对于 LY12 铝合金, 以 100 °C, 6 h 欠时效的 FTMT 强化效果最佳, 经“固溶淬火+100 °C, 6 h+30%CR+150 °C, 6 h”处理的 LY12 铝合金, 其 σ_b 达 560 MPa, $\sigma_{0.2}$ 达 470 MPa, δ_{10} 仍保持 8%, 合金在获得高强度的同时保持了较好的塑性。

与室温预时效相比, 100 °C 预时效能为终时效提供较多的有效形核核心, 有利于 FTMT 强化; 与 150 °C, 6 h 和 190 °C, 4 h 的预时效相比, 根据文献[7, 8]的实验结果, 硬铝合金 100 °C 预时效不会析出 S' 相; 而 150 °C 和 190 °C 预时效均能析出 S' 相, 而 S' 相此时通常在不均匀分布的淬火位错环上优先析出^[6], 使随后变形无法有效地改变这种不均匀分布, 因而 150 °C 和 190 °C 预时效的 FTMT 的强化效果差些。

2.3 冷变形的影响

本研究采用的 FTMT 为冷变形。由于冷变形程度决定加工硬化大小, 而铝合金的加工硬化曲线具有抛物线特征^[9], 当变形程度达到 30% 后, 随着变形程度的增加, 强度提高不大, 故冷变形程度的优选范围选为 10% 至 30%。

考察表 1 中 III 组的结果, 当冷变形程度从 10% 增至 20%, 平均每增加 1%, 其 σ_b 提高 4

MPa, $\sigma_{0.2}$ 提高 6.5 MPa, $\delta\%$ 下降 0.3%; 而冷变形程度从 20% 增至 30%, 平均每增加 1%, 其 σ_b 和 $\sigma_{0.2}$ 均只提高 2.5 MPa, 而延伸率几乎不下降。延伸率几乎不下降是因为冷变形程度大于 20% 后, 变形趋于均匀, 且变形引入的更高密度位错促进终时效沉淀析出相更均匀弥散, 有利于保持良好的塑性。由此可见, 冷轧 30% 的 FTMT 在显著提高合金强度的同时仍保持较好的塑性。

事实上, 冷变形将影响到: (1) 加工硬化大小; (2) 终时效的沉淀析出, 变形引入高密度的位错能提供非自发形核核心, 且变形能防止预时效生成的核心在终时效的溶化, 防止铝合金的回归, 可见适当的变形将大大改善沉淀析出组织; 同时变形会加速终时效的沉淀析出^[5]; (3) 变形均匀程度; (4) 应变诱发沉淀^[10]。塑性变形能防止铝合金的回归, 是铝合金最终形变热处理强化机理的一个重要问题, 但其机制如何尚有待探讨。根据 FTMT 中位错、空位与溶质原子的交互作用分析, 我们认为其机制是: 铝合金在较高过饱和空位浓度条件下, 塑性变形引入的大量位错是空位最有效的吸收源, FTMT 的变形使终时效的空位锐减, 因而靠高浓度过饱和空位的快速扩散才能进行的铝合金回归过程, 此时已难以进行, 从而防止了终时效的回归。

2.4 FTMT 合金的显微组织

图 1 为 LY12 铝合金自然时效状态的 TEM 组织, 图中杆状物应为富锰相质点^[4], 由图 1(b) 的暗场像可看到溶质原子富集的 GPB 区衬度。由图 1 可见, LY12 合金自然时效状态存在大量的 GPB 区, 此外还有少量的淬火位错环。

图 2(a) 为 100℃ 时效 6 h 后的显微组织, 与图 1(a) 相比, 此时沉淀析出更为明显, 分布不均的淬火位错环增多并呈长大趋势; 图 2(b) 为合金“100℃, 6 h+30%CR”处理后的组织, 与图 2(a) 相比, 此时变形引入大量的位错, 且位错分布比较均匀; 图 2(c) 为经“100℃, 6 h+30%CR+150℃, 6 h”FTMT 工



图 1 LY12 合金自然时效状态 TEM 照片
(a)—明场像; (b)—暗场像

艺处理后的显微组织, 位错有明显回复, 但仍见大量被析出粒子钉扎的位错, 且析出粒子细小弥散。

2.5 FTMT 工艺优化的原则

从优选的 FTMT 工艺“100℃, 6 h+30%CR+150℃, 6 h”中合金的显微组织发展, 我们认为冷变形的铝合金 FTMT 强化工艺的优化应遵循如下原则: (1) 预时效应选适当的欠时效, 以便为 FTMT 的变形和终时效提供良好的组织准备; 对于 LY12 铝合金, 欠时效以 100℃, 6 h 为佳; (2) 冷变形程度的优选, 应综合考虑加工硬化大小、变形的均匀程度和设备加工能力, 对冷轧以 20%~30% 为宜, 在设备加工能力许可时为得到更高的强度应取上限; (3) 终时效工艺参数的选取: 终时效温度以稍高于预时效温度为好, 因为终时效温度过高, 位错回复显著, 析出物容易发生不均匀长大, 也容易生成不利于强化的平衡相; 终时效温度过低, 预时效形成的核心不能顺利转为过

用合金的加工硬化和沉淀硬化,从而在获得高强度的同时保持良好的塑性。

3 结 论

(1) 在 LY12 铝合金最终形变热处理强化工艺中,预时效应选 100℃、5~6h 的欠时效,此时既能为终时效准备均匀的形核核心,保留适当的过饱和溶质原子浓度,又能避免 S' 相不均匀析出,为 FTMT 的变形和终时效提供良好的组织状态。

(2) 在预时效为欠时效状态下,塑性变形提供了更多的非自发形核核心。塑性变形防止铝合金终时效的回归,是变形引入的大量位错吸收了淬火过饱和空位的缘故。冷变形程度影响合金加工硬化大小和变形均匀程度,以 20% 至 30% 为宜。

(3) 对 LY12 铝合金 FTMT 工艺,建议根据“固溶淬火+100℃、6h 预时效+30%CR+150℃、6h 终时效”来制订。

参考文献

- 1 McQueen H J. J Metals, 1980, 32(2): 17-25.
- 2 宇野照生,马场义雄. 轻金属, 1976, 26(7): 347-355.
- 3 Paton N E, Sommer A W. In: Proc 3rd Int Conf Strength, Metals and Alloys. London: Metals Soc and Iron Steel Inst, 1973, Vol. 1: 101-108.
- 4 《有色金属及其热处理》编写组(编著). 有色金属及其热处理. 北京: 国防工业出版社, 1981. 92-128.
- 5 Nutting J. Metall Trans, 1971, 2(1): 45-51.
- 6 [美]史密斯 W F(著), 张 泉等(译). 工程合金的组织性能. 北京: 冶金工业出版社, 1984. 206-211.
- 7 Silcock J M. J Inst Metals, 1960-61, 89: 203-210.
- 8 赵显麒, 藤 川, 平野. 轻金属, 1977, 27(6): 263-268.
- 9 Polmear I J. Light Alloys, Metallurgy of the Light Metals. London: Edward Arnold Ltd, 1981. 63-66.
- 10 Lei Tingquan; Wang Dezun. In: Gifkins R C(ed), Strength of Metals and Alloys (ICSMA6). Pergamon Press. 1983. Vol. 1: 307-312.

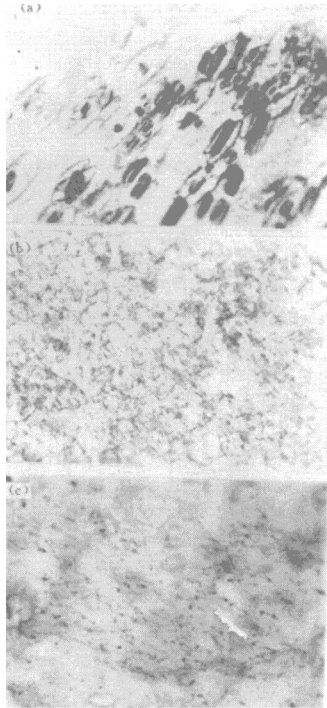


图2 FTMT 中 LY12 合金组织的变化

(a)—100℃, 6h; (b)—100℃, 6h+30%CR;

(c)—100℃, 6h+30%CR+150℃, 6h

渡相,也不利于发挥由变形改善过渡沉淀析出相的作用。终时效时间比普通双级时效的终时效时间短,因为变形加速了人工时效^[5]。对于 LY12 合金,终时效工艺参数以 150℃, 6h 为好,此时不仅能保证过渡沉淀相均匀弥散析出,同时能保留较高的位错密度,充分合理利