

文章编号:1000-582X(2010)11-066-04

# 形变热处理对 2197 铝锂合金组织和性能的影响

毛柏平, 李俊鹏, 沈 健

(北京有色金属研究总院, 北京 100088)

**摘 要:**对 2197 合金进行形变热处理,通过力学性能试验和 TEM 观察分析了不同时效阶段合金的力学性能和微观组织,研究了形变热处理对 2197 合金的组织 and 性能影响,结果表明:形变热处理 2197 合金峰时效时主要析出相为尺寸为 50~150 nm 分布均匀的 T1 相。形变热处理为 T1 相的非均匀形核提供了优越的形核场所,促进了 T1 相的析出及长大,减少了 2197 合金达到峰时效的时间;长宽比较大的 T1 相的强化效果大于  $\delta'$  相和  $\theta'$  相,形变热处理还可以提高 2197 合金的峰时效强度。

**关键词:**2197 Al-Li 合金;形变热处理;微观组织;力学性能;T1 相

**中图分类号:**TG166.3

**文献标志码:**A

## Effect of thermo-mechanical treatment on microstructure and mechanical property of 2197 Al-Li alloy

MAO Bai-ping, LI Jun-peng, SHEN Jian

(General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, P. R. China)

**Abstract:** For thermo-mechanical treated 2197 alloy of various states, effects of thermo-mechanical treatment on the mechanical properties and microstructure of 2197 alloy are studied through analyzing the mechanical properties in tensile tests and observing the microstructures by TEM observation. Results show that the dominating precipitated phase of peak-aged 2197 alloy during thermo-mechanical treatment is T1 phase, the size of which is 50~150 nm. The precipitation and growth of T1 phase are accelerated due to the excellent nucleation sites of heterogeneous nucleation for T1 phase offered by thermo-mechanical treatment, therefore, the time for 2197 alloy to reach the peak-aged state is shortened. The strength of 2197 alloy for peak-aged state is increased through thermo-mechanical treatment because the strengthening effect of T1 phase with higher aspect ratio is bigger than that of  $\delta'$  and  $\theta'$  phases.

**Key words:** 2197 Al-Li alloy; thermo-mechanical treatment; microstructure; mechanical properties; T1 phase

铝锂合金具有低密度、高比强度和比刚度及良好的耐腐蚀性和卓越的超塑成型性能等特点,用其取代常规铝合金,可使构件质量减轻 10%~15%,刚度提高 10%~20%,因此被认为是 21 世纪航空航天工业领域中最理想的轻质高强结构材料<sup>[1-3]</sup>。

2197 铝锂合金作为第三代铝锂合金由于具有较高的强度和低的各向异性受到普遍关注,该合金属于 Al-Cu-Li-Mg-Mn 系合金,主要析出强化相为  $\delta'$ 、 $\theta'$  和 T1 等<sup>[4-5]</sup>。2197 合金时效热处理研究发现对合金固溶热处理后直接进行时效存在合金强度达到峰

收稿日期:2010-05-30

基金项目:国防科工委“十五”重点资助项目(MKPT-2004-19ZD)

作者简介:毛柏平(1976-),男,博士研究生,主要从事轻合金及塑性加工工艺研究。

沈健(联系人),男,教授级高工,博士生导师,(Tel)010-82241286;(E-mail)maobaiping@grinm.com。

值时间长、强度相对不高等问题<sup>[5]</sup>,已有研究表明对固溶后的铝合金进行预拉伸可引入位错,进而影响合金中强化相的析出行为,Rioja 等人的研究表明形变热处理可提高铝锂合金的强度,乃至改善铝锂合金的各向异性<sup>[1,6-8]</sup>。然而,国内外关于形变热处理对工业用 2197 合金的组织及力学性能的公开报道尚不多见。因此,研究形变热处理对 2197 合金的析出行为的影响,进而分析形变热处理工艺与该合金组织和性能之间的关系,对于该合金的工业生产具有重要的理论指导意义。

笔者以工业轧制 2197 合金板材为研究对象,对固溶处理后合金进行形变热处理,通过对不同热处理阶段合金板材进行显微组织观察和力学性能测试,对比文献中未经形变热处理 2197 合金板材的组织 and 力学性能特征,分析形变热处理对 2197 合金组织和力学性能的影响。

## 1 实验方法

试验样品取自工业热轧板材,化学成分为  $\omega(\text{Cu})=2.88\%$ ,  $\omega(\text{Li})=1.50\%$ ,  $\omega(\text{Mg})=0.24\%$ ,  $\omega(\text{Mn})=0.35\%$ ,  $\omega(\text{Zr})=0.09\%$ ,  $\omega(\text{Fe})=0.05\%$ ,  $\omega(\text{Si})=0.04\%$ ,  $\omega(\text{Zn})<0.006\%$ ,余量为 Al。合金板材经  $520\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}$  固溶处理,水淬至室温。随后对其进行形变热处理,预拉伸变形量为  $2\%\sim 3\%$ ,时效温度为  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

采用拉伸试验测定合金的室温力学性能,获得其时效硬化曲线,将不同热处理状态的合金板材按照 GB9379—1986 进行加工成棒状拉伸试样,测定力学性能设备为 Instron 4206,拉伸速率为  $2\text{ mm/min}$ 。将不同热处理状态的合金板材试样制备成透射电镜试样,采用 H800 透射电镜观察不同热处理状态的 2197 合金显微组织,加速电压为  $160\text{ kV}$ 。

## 2 试验结果

### 2.1 时效强化曲线

图 1 所示为 2197 合金 T8 状态的室温力学性能与时效时间的关系曲线。由曲线观察可以发现 2197 合金的抗拉强度和屈服强度随着时效时间的延长而增大,当时效时间为  $20\text{ h}$  时,合金的强度达到峰值,抗拉强度为  $495\text{ MPa}$ ,屈服强度为  $460\text{ MPa}$ 。当达到峰时效后,合金的强度随着时效时间的延长而逐步降低;当时效时间为  $48\text{ h}$  时,合金的抗拉强度为  $465\text{ MPa}$ ,屈服强度为  $420\text{ MPa}$ 。由图 1 中也可以观察到合金的延伸率随着时效时间的变化情况:随着时效时间的延长,合金的延伸率逐

渐下降,由初始时的  $18\%$  降低到峰时效时的  $13.5\%$ ;当时效时间超过  $28\text{ h}$  时,合金的延伸率变化不大;当时效时间为  $40\text{ h}$  时,合金的延伸率为  $12\%$ 。

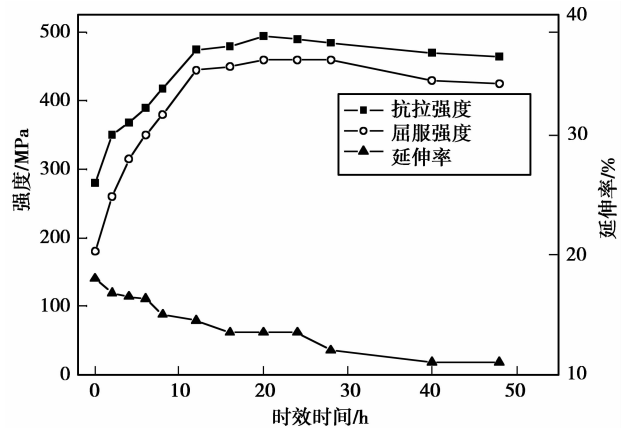


图 1 2197 合金力学性能与时效时间的关系

### 2.2 微观组织

不同热处理状态 2197 合金试样的典型析出相的微观组织形貌如图 2 所示。图 2(a)所示为经固溶热处理预拉伸后于  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  时效  $12\text{ h}$  (欠时效)的 2197 合金板材的典型析出相形貌,由图中观察可以发现合金中除存在尺寸为  $15\text{ nm}$  左右圆形的  $\delta'$  析出相之外,还存在针状析出相,该针状相呈现斜交叉状态,部分针状相尺寸较小,尺寸在  $20\text{ nm}$  左右,显示此相正处于析出长大阶段,文献研究表明该相为 T1 相<sup>[5,9]</sup>;另外在合金中还存在少量的  $\theta'$  相,如图中所示。图 2(b)所示为  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  时效  $20\text{ h}$  (T851 峰时效)的 2197 合金板材的典型析出相形貌,可以发现此状态的合金中主要析出相为斜交叉的针状 T1 相,其尺寸在  $50\sim 150\text{ nm}$ ,该相分布均匀。图 2(c)所示为  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  时效  $40\text{ h}$  (T851 过时效)的 2197 合金板材的典型析出相形貌,可以观察到此时合金中主要存在大量的杆状相,其长度均在  $100\text{ nm}$  以上,为已经长大的 T1 析出相,该相的长宽比明显小于峰时效时 2197 合金中 T1 相。

## 3 分析讨论

2197 合金是属于 Al-Cu-Li-Mg-Mn 系合金,研究表明<sup>[10-12]</sup>:对于 Cu 含量为  $2\%\sim 5\%$  (质量分数)的 Al-Cu-Li 系合金,当 Cu/Li 含量的比值小于 2 时,其主要析出过程大致如下, $\alpha$  过饱和固溶体  $\rightarrow$  G.P. 区  $+\delta' \rightarrow$  T1  $+\delta' +\theta' \rightarrow$  T1。通过观察不同时效状态的 2197 合金析出相的情况也体现了这一过程, $\delta'$  相在淬火态及时效初期优先析出,消耗了 Li 原子,因而

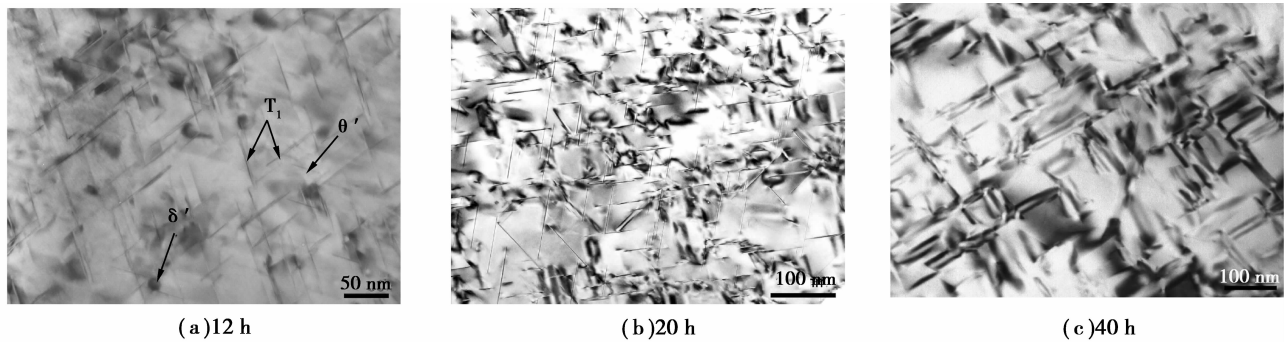


图 2 不同时效时间的 2197 合金的显微组织

在欠时效状态时 T1 相析出量较少,且尺寸较小,如图 2(a)中所示。在峰值时效态时,T1 相较密集、均匀,而  $\delta'$ 相含量大大减少,如图 2(b)中所示,表明部分 T1 相是消耗  $\delta'$ 相而长大。

通过图 2 中观察可以发现 T1 为 2197 合金形变热处理峰时效时的主要强化相,研究表明<sup>[8,9,13,14]</sup>: T1 相为六方晶系,晶格常数为: $a \approx 0.4965 \text{ nm}$ , $c \approx 0.9345 \text{ nm}$ 。T1 相与基体存在如下惯析关系: $(0001)_{\text{T1}} // (111)_{\text{Al}}$ , $[1010]_{\text{T1}} // [110]_{\text{Al}}$ ,惯析面为  $\{111\}_{\text{Al}}$ ,对合金性能有重要的影响。T1 相为密排六方结构(hcp),T1 相要想在面心立方(fcc)结构的 Al 基体中析出,基体中的层错是 T1 相形核的最佳场所<sup>[5]</sup>。因此,一般认可 T1 相是通过堆垛层错形核机制长大的,易在位错和晶界上不均匀地析出。由于预拉伸时效会在晶体中引入缺陷,因此,预拉伸时效对 T1 相的形核及长大具有重要影响。

黄兰萍<sup>[5]</sup>对固溶后进行直接时效(未进行预拉伸)2197 合金的析出行为进行了研究,结果表明:2197 合金需经 48 h 时效才会达到峰时效状态,且其力学性能的强度与时效时间与笔者中实验结果对比如表 1 所示,可以发现其抗拉强度较 T851 时效状态低 26%左右。T6 峰时效时存在的强化相为  $\delta'$ 、 $\theta'$  和 T1 相的联合强化。

表 1 2197 合金不同时效状态的强度

状态	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\delta/\%$	时效时间/h
T6	361.9	10.32	48
T851	495	13.5	20

以上实验研究结果表明:通过形变热处理可缩短 2197 合金达到峰时效的时间且提高合金的峰时效强度。这是由于:形变热处理通过预变形会增加合金中的位错密度,并且当 2197 合金中某些位错的

柏氏矢量不是晶体点阵的平移矢量时,在预拉伸过程中,位错扫过后,位错扫过的面两侧会产生错排,即产生了层错<sup>[15]</sup>,这些层错可以作为 T1 相的形核位置,因此,通过形变热处理为 T1 相的非均匀形核提供了优越的形核场所,加快 T1 相的形核,从而促进了 T1 相的析出及长大,使得 2197 合金的力学性能指标快速增加;另一方面,由于 T1 相的较早形核及长大,消耗了溶质原子,因而抑制了  $\theta'$ 相的析出及继续长大,如图 2 所示,当达到峰时效状态时,2197 合金中的析出相主要为 T1 相,T1 相的大量析出导致  $\theta'$ 和  $\delta'$ 相减少甚至消失。对于铝合金而言,在基体  $\{111\}_{\alpha}$  晶面簇、 $\{100\}_{\alpha}$  晶面簇上析出的盘状粒子以及基体  $\langle 100 \rangle_{\alpha}$  晶向簇上析出的棒状粒子和球状粒子四者中,以  $\{111\}_{\alpha}$  为惯析面析出的板状相引起的临界分切应力增量  $\Delta\tau$  最大,即强化效果最大,而且其长宽比越大,强化效果越大<sup>[13,14,16]</sup>。因此长宽比较大的 T1 相的强化效果大于  $\delta'$ 相,也大于长宽比相对较小的  $\theta'$ 相。由于 T851 态的 2197 合金以尺寸在 50~150 nm 之间的 T1 相为主要析出强化相(如图 2(b)所示),而 T6 态的 2197 合金是  $\delta'$ 、 $\theta'$  和 T1 相的联合强化,因此,形变热处理峰时效 2197 合金的强度大大高于其 T6 状态的强度。另一方面,虽然过时效状态时,2197 合金中的主要强化相仍为 T1 相,然而其长宽比急剧减少(如图 2(c)所示),因而其强化效果降低,合金的强度下降。

## 4 结 论

1)2197 合金板材经固溶处理后,进行预拉伸变形量为 2%~3%的形变热处理,当时效温度为 170 °C 时,经 20h 时效后合金强度达到峰值,其抗拉强度为 495 MPa,屈服强度为 460 MPa,延伸率为 13.5%。

2)形变热处理 2197 合金中,欠时效(170 °C 时效 12h)时,其主要强化相为 15 nm 左右圆形的  $\delta'$ 析

出相,尺寸在 20 nm 左右的 T1 相和少量的  $\theta'$  相;峰时效时主要析出相为分布均匀的 T1 相,其尺寸为 50~150 nm。

3)形变热处理为 T1 相的非均匀形核提供了优越的形核场所,缩短了 T1 相的形核时间,促进了 T1 相的析出及长大,减少了 2197 合金达到峰时效的时间;另一方面,由于 T1 相的较早析出消耗了溶质原子,抑制了  $\theta'$  的析出,因此,形变热处理峰时效状态时,2197 合金中主要强化相为 T1 相。由于长宽比较大的 T1 相的强化效果大于  $\delta'$  相和  $\theta'$  相,因此,形变热处理峰时效(T851)状态的 2197 合金的强度大于 T6 状态 2197 合金的强度。

#### 参考文献:

- [1] RIOJA R J. Fabrication methods to manufacture isotropic Al-Li alloys and products for space and aerospace applications [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1998, 257(1): 100-107.
- [2] MUKHOPADHYAY A K. High strength aluminum alloys for structural application [J]. *Metals materials and processes*, 2007, 119 (1): 1-26.
- [3] 刘雪峰,汪凌云. 铝锂合金高温变形流变应力的人工神经网络模型[J]. *重庆大学学报*, 2001, 24(2): 68-71.  
LIU XUE-FENG, WANG LING-YUN. Artificial neural networks models for flow stress during high temperature plastic deformation of Al-Li alloy [J]. *Journal of Chongqing University*, 2001, 24(2): 68-71.
- [4] LUIS A H, TERRONES, MONTEIRO S N. Composite precipitates in a commercial Al-Li-Cu-Mg-Zr alloy [J]. *Materials Characterization*, 2007, 58 (2): 156-161.
- [5] 黄兰萍,郑子樵,黄永平. 2197 铝-锂合金的组织 and 性能 [J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14 (12): 2066-2071.  
HUANG LAN-PING, ZHENG ZI-QIAO, HUANG YONG-PING. Microstructure and properties of 2197 Al-Li alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(12): 2066-2071.
- [6] BAIRWA M L, DATE P P. Effect of heat treatment on the tensile properties of Al-Li alloys [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 12 (153/154): 603-607.
- [7] KIM H J, NIINOMI M. The role of microstructures on the strengthening mechanisms of a thermomechanically processed 2091 Al-Li alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2000, 284(1/2): 14-24.
- [8] GABLE B M, ZHU A W, CSONTOS A A, et al. The role of plastic deformation on the competitive microstructural evolution and mechanical properties of a novel Al-Li-Cu-X alloy [J]. *Journal of Light Metals*, 2001, 1(1): 1-14.
- [9] YOSHIMURA R, KONNO T J, ABE E, et al. Transmission electron microscopy study of the evolution of precipitates in aged Al-Li-Cu alloys: the  $\theta'$  and T1 phases [J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(14): 4251-4266.
- [10] KATSIKIS S, BOBLE B, HARRIS S J. Microstructural stability during low temperature exposure of alloys within the Al-Li-Cu-Mg system [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 485(1/2): 613-620.
- [11] 黄光杰,汪凌云. 热处理对 2024 铝合金组织和性能的影响 [J]. *重庆大学学报*, 2000, 23 (4): 99-102.  
HUANG GUANG-JIE, WANG LING-YUN. Effect of Heat Treatment Process on Structure and Properties of 2024 Aluminum Alloy [J]. *Journal of Chongqing University*, 2000, 23 (4): 99-102.
- [12] GUPTA R K, NAYAN N, NAGASIREESHA G, et al. Development and characterization of Al-Li alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 420(1/2): 228-234.
- [13] AHMADI S, ARABI H, SHOKUH FAR A. Formation mechanisms of precipitates in an Al-Cu-Li-Zr alloy and their effects on strength and electrical resistance of the alloy [J]. *Journal of Alloys*, 2009, 484 (1/2): 90-94.
- [14] LI JIN-FENG, ZHENG ZI-QIAO, REN WEN-DA, et al. Simulation on function mechanism of T1 (Al<sub>2</sub>CuLi) precipitate in localized corrosion of Al-Cu-Li alloys [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, 16(6): 1268-1273.
- [15] 余永宁. 材料科学基础 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [16] HOGG S C, PALMER I G, THOMAS L G, et al. Processing, microstructure and property aspects of a spraycast Al-Mg-Li-Zr alloy [J]. *Acta Materialia*, 2007, 55 (6): 1885-1894.

(编辑 王维朗)