

热处理对 2195 铝锂合金组织及性能的影响

胡丽敏 张 帅 成 桃 李爱文 王海军

(航天新力科技有限公司, 贵州 563003)



摘要: 铝锂合金因具有高比强度、高耐腐蚀和抗疲劳等优点, 常作为受力结构件被广泛应用于航天航空领域。本文系统研究了 2195 铝锂合金的制造工艺, 成功制备了性能优越的锻板, 为其工业生产提供了理论依据; 综合采用金相显微镜、硬度计和拉伸试验机等手段, 分别探索了不同热处理对 2195 铝锂合金的组织及性能的影响。经拉伸测试发现, 所制备 2195 铝锂合金锻板的抗拉强度高达 602MPa, 延伸率 9.5%。

关键词: 2195 铝锂合金; 热处理; 组织; 性能

中图分类号: TG156.9 文献标识码: A

Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of 2195 Al-Li Alloy

Hu Limin Zhang Shuai Cheng Tao Li Aiwen Wang Haijun

(Guizhou Aerospace Xinli Technology Co., Ltd., Guizhou 563003)

Abstract: Al-Li alloy is widely used in aerospace field as a stressed structure due to its high specific strength, high corrosion resistance and fatigue resistance. In this paper, the manufacturing process of 2195 Al-Li alloy is systematically studied, and the forging plate with superior performance is successfully prepared, which provides theoretical basis for its industrial production. The effects of different heat treatments on the microstructure and properties of 2195 Al-Li alloy were investigated by means of metallographic microscope, hardness tester and tensile machine. The tensile test shows that the tensile strength of the forged sheet is up to 602MPa and the elongation is 9.5%.

Key words: Al-Li alloy; heat treatment; organizations; performance

1 引言

锂是迄今为止被发现的最轻的金属元素, 密度为 0.534g/cm^3 。大量研究发现, 每添加 1.0% (质量分数, 下同) Li 元素在铝合金中可使密度降低 3%, 弹性模量上升 10%~20%^[1,2], 且其强度可与传统的 2024、7075 等铝合金媲美。铝锂合金材料除了具有密度低、弹性模量高、比强度和比刚度比较高外, 还具有优异的疲劳性能、耐腐蚀及焊接性能^[3~5], 并且比复合材料气动性更好、防腐能力更强、成本更低, 比镁合金更耐腐蚀、成型性能更好。因此, 在航天航空领域用铝锂合金代替常规的高强度铝合金可使结构质量减轻 10%~

20%, 刚度提高 15%~20%。进入空中的航天运载器, 每减轻 1kg, 其发射费用将节省约 2 万美元, 因此结构减重在航天领域可谓“克克计较”。在航空航天轻量化要求日益严峻的情况下, 作为被全球公认是航天航空领域最理想轻质结构材料之一, 铝锂合金材料在航空航天领域显现出了广阔的应用前景^[6]。

铝锂合金既是变形铝合金也是可热处理强化铝合金, 常见的强化和增韧方法是通过一系列热处理手段进行调控, 通常包括铸锭的热变形处理和变形合金的固溶和时效处理^[7~9]。通过前期的努力, 2195 合金的力学性能得到了显著改善。但合金的峰值应力大多仍为 550~590MPa, 断裂伸长率往往低于 9%^[10~13]。因

基金项目: 航天用高纯高均质铝锂合金铸锭熔炼制备技术研究 (120000820)。

作者简介: 胡丽敏 (1993), 硕士, 材料科学与工程专业; 研究方向: 新材料制备加工技术研发。

收稿日期: 2021-11-16

此,同时赋予 2195 Al-Cu-Li 合金较高的抗拉强度和良好的塑性仍然是一个挑战。目前,国内铝锂合金工业化制备仍存在工艺流程长、控制难、材料纯净性差且性能落后,产品成本高、产能小等核心技术难题。因此,通过真空感应熔炼制备技术和一系列热处理调控,生产材料纯净度高且力学性能优异的 2195 铝锂合金锻板,并探索均匀化退火和 T6 及 T8 热处理工艺对 2195 铝锂合金组织及性能的影响。

2 实验方法

将配好的纯 Al、AlCu50、AlCr5 合金、纯 Li、纯 Mg 和纯 Ag 等原材料采用真空感应炉熔炼铸造,得到直径 145mm、重 10kg 的 2195 铝锂合金铸锭;对铸锭取样进行 ICP 和光谱测试,测得铸锭的化学成分如表 1 所示。从表 1 可以看出,铸锭实测化学成分结果符合标准 ASTM A217—2020 中 2195 铝锂合金的要求。

表 1 合金的化学成分 wt. %

Alloy	Li	Cu	Mg	Ag	Zr	Si	Fe	Mn	Zn	Ti
美国铸锭	0.8~1.2	3.7~4.3	0.25~0.8.	0.25~0.6	0.08~0.16	0.12	0.15	0.25	0.25	0.10
自研铸锭	0.89	3.7	0.45	0.35	0.12	0.042	0.045	0.029	0.035	0.012

表 2 为真空熔炼铸锭的杂质元素含量。从表中可以看出,铸锭中的 Fe、Si 等易生成不溶或难溶脆性相元素含量远低于标准中要求;碱金属杂质 Na、Ca 的含量较低,H 含量远小于 0.0001%。这说明铸锭的纯净度比较高。

表 2 铸锭中杂质元素含量 wt. %

Alloy	Fe	Si	Ca	Na	H
铸锭	0.045	0.042	0.0005	0.0001	0.000021

从铸锭头部和尾部沿铸锭半径方向在边缘和中心各取一块试样进行金相观察,然后切掉铸锭头尾部分,进行均匀化处理(490℃/40h),并在锭子一端取小块试样进行均匀化组织观察,然后将退火后的铸锭锻造变形得到厚度为 28mm 的锻板,沿锻板主变形方向和垂直主变形方向各取六个拉伸试样(Φ10mm 拉棒),两个方向各取三个试样进行固溶处理(510℃/2h)+7%预变形+人工时效(160℃/18h),得到 T8 态试样;剩下的试样进行 T6 态热处理(510℃/2h+人工时效 160℃/18h);最后将 T6/T8 态试样进行拉伸性能测试以及组织观察。其中,铸态和退火态金相试样尺寸:15mm×10mm×10mm, T6/T8 态金相试样:Φ10mm×12mm。

在 CTM4105 万能拉伸试验机上进行力学性能测试,试样尺寸沿锻板主变形方向按国标取 Φ10mm 拉棒,引伸计标距为 50mm,拉伸速率为 1mm/min。为了保证实验数据的可靠性,每个状态的实验合金准备 3 个平行样,每个状态点的屈服强度($\sigma_{0.2}$)、抗拉强度(σ_b)以及延伸率(δ)都是取三个平行样的平均值。

在 JMHVS-100-XYZ 全自动精密显微硬度计上进行硬度测试,硬度计载荷为 1.96N,持续时间为 15s,

每个测试点测 6 次,取平均值,当取值之间差值较大时,去掉最大、最小值后再取平均值。

利用 AXIO VERT A1 蔡司显微镜观察分析合金的相显微(OM)组织。将需要进行金相观察的试样依次在 400#、800#、1500#、2000#、3000#砂纸上研磨,然后进行机械抛光,用浓度为 0.5%的氢氟酸(HF)溶液对抛光后铸态和均匀化态试样进行腐蚀,腐蚀时间为 30 ~ 40s; T6/T8 态试样用 Keller 试剂(2.5% HNO_3 +1.0% HF +1.5% HCl +95% H_2O)腐蚀 30~50s。

3 实验结果与分析

3.1 热处理工艺对 2195 铝锂合金性能的影响

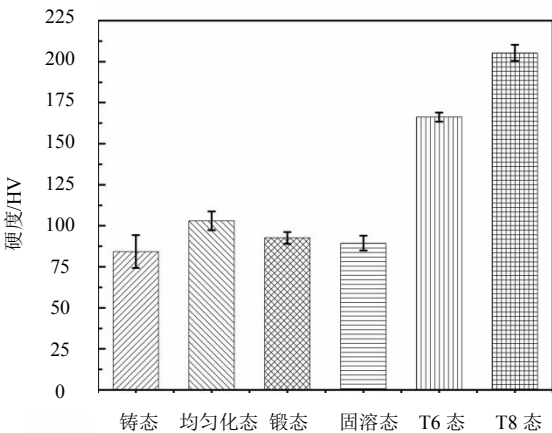


图 1 2195 铝锂合金不同热处理状态的硬度图

图 1 为 2195 合金经不同热处理后的硬度图。不同热处理对合金的硬度有明显影响,可以看出 T6 和 T8 热处理能明显提高合金的硬度,且 T8 态合金硬度比

T6 态高。这是因为在 T6 处理过程中, 固溶时会产生固溶强化, 而后续的时效处理还会产生析出相, 当发生变形时, 析出相会阻碍位错移动, 从而提高合金的强度; T8 处理除了固溶强化外, 其在时效前引入预变形, 一方面产生了变形强化, 使得后续的析出时效强化在较高的强度起点进行, 另一方面, 时效前预变形引入大量位错为后面析出强化相提供形核位置, 促进析出相析出, 显著提高合金的强度。

图 2 为 2195 合金 T6/T8 处理后的拉伸性能。T6 态拉伸样的抗拉强度和屈服强度分别为 491MPa、394MPa, 断面收缩率以及延伸率分别为 33%、14.5%; T8 态合金的抗拉强度、屈服强度、断面收缩率以及延伸率分别是: 602MPa、560MPa、24.5%、9.5%。虽然 T8 态合金的抗拉强度中比 T6 态合金高, 但是 T6 态合金的延伸率比 T8 态要好。猜测这是因为 T8 处理过程中引入了预变形, 预变形会出现大量位错, 而位错是通过攀移、滑移等形式存在, 会形成位错网络和缠结, 改变合金的亚结构, 为析出相提供优越的形核位点, 促进析出强化, 提高合金的强度。但 7% 预变形量使得位错密度比较高, 促进析出相大量形核, 使得在析出前期就消耗掉大量 Cu 和 Li 元素, 导致析出后期这两种元素不足, 从而析出短小的 T1 相, 而 T1 相是硬脆性相, 分散共面滑移的效果不明显, 不利于塑性的改善, 因此 T8 态合金塑性较差^[14]。

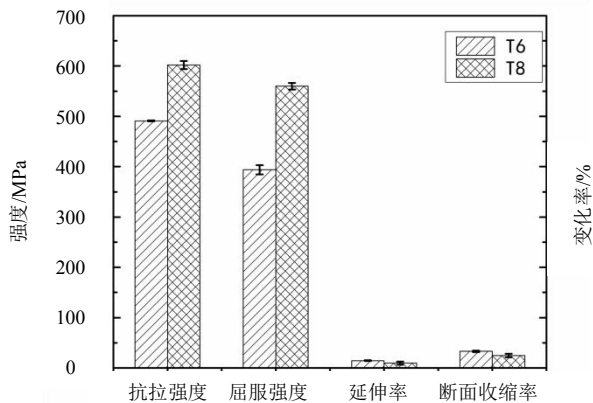


图 2 T8/T6 态 2195 铝锂合金的力学性能

3.2 热处理工艺对 2195 铝锂合金组织的影响

3.2.1 均匀化退火

图 3 为 2195 合金均匀化 (490℃/40h) 前后的金相组织图。从图 3a~图 3d 中可以看出, 铸锭头部组织呈明显的树枝晶特征且尺寸较大, 呈连续而密集的枝晶网状结构, 尾部的树枝晶尺寸较小, 这是由于尾部合金温度梯度较低, 冷却速度较小造成的。铸锭心部的

树枝晶要比边部尺寸大, 是由于在浇注凝固过程中, 心部温度梯度小, 冷却速度小造成的。此外, 从高倍金相图中看出, 合金中存在大量的结晶相和组织成分偏析, 晶界上富集着许多非平衡共晶体和其他非平衡相。可以从两方面来解释晶界附近分布的这些第二相。一方面, 铸态合金晶界附近上 Cu 元素的偏析降低了铝合金的层错能, 为其析出提供了有利条件。另一方面, 从凝固理论上, 溶质原子 ($K < 1$) 被排斥并聚集到固液界面前面, 而 Cu 原子 ($K_{Cu} = 0.17$) 在晶界偏析, 容易形成粗大含 Cu 相, 这些相会大量消耗 Cu 含量, 不利于远离晶界的二次相的形核和生长^[15]。对比铸态和均匀化退火态 2195 合金的金相组织可以看出, 合金经 490℃/40h 均匀化处理后, 枝晶网络状组织大量减少, 晶界变得清晰平直, 晶界和晶内共晶相数量减少, 说明合金均匀化效果明显。而且晶界析出相由铸态的连续分布变得离散, 晶界变细薄, 这说明了铸态沿晶界可溶共晶相回溶至基体。

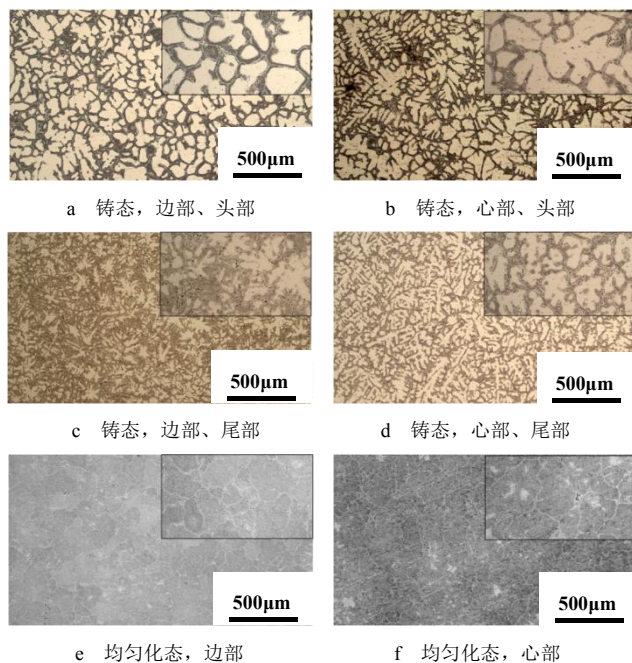


图 3 2195 不同状态合金在不同位置的金相图

3.2.2 T6/T8 热处理

图 4 为 T6/T8 态的 2195 铝锂合金锻板不同方向截面的金相组织图。从图中可以看出, T6 和 T8 态合金组织中均存在被拉长的纤维组织、带状组织和被挤碎的粗大第二相, 其中第二相沿主变形方向聚集分布; T8 态合金的金相组织较 T6 态纤维组织较细长、密集。对比两种状态的金相组织可猜测对材料强度起决定性作用的是析出强化相的特征, 需要对其进行扫描和透

射分析。

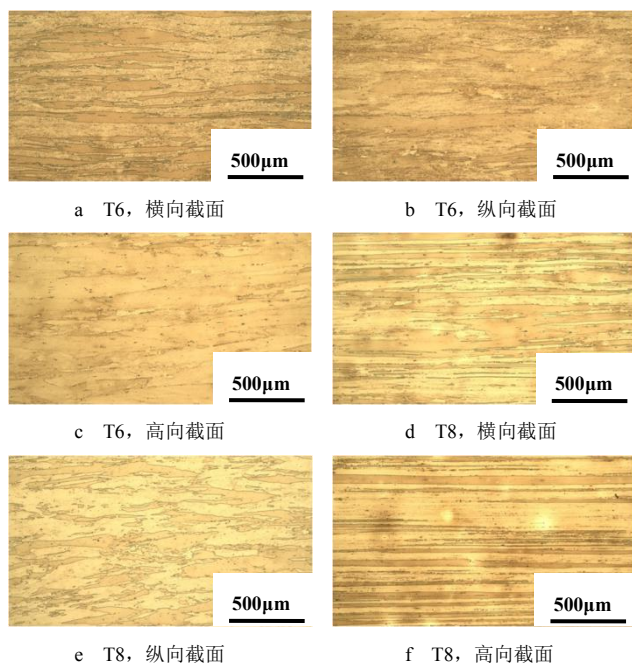


图4 2195合金锻板经T6、T8热处理后不同方向截面的金相图

4 结束语

a. 利用真空感应炉成功熔炼出了较高纯净度的2195铝锂合金，再经锻造得到锻板，锻板经过均匀化（490℃/40h）、固溶（510℃/2h）、7%预变形以及时效（160℃/20h）后，合金的抗拉强度达到602KPa，延伸率9.5%。

b. 均匀化处理后，原始铸态组织中的宏观枝晶网络状组织大量减少，晶界变得清晰平直，晶界和晶内共晶相数量减少。

c. T6或T8处理后，合金的硬度值翻倍，其组织中存在被拉长的纤维组织、带状组织和被挤碎的粗大第二相以及再结晶晶粒，但是T8态合金由于引入了预变形，增加了强化效果，其强度比T6态高。

参考文献

- 1 Meric C. An investigation on the elastic modulus and density of vacuum casted aluminum alloy 2024 containing lithium additions[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2000, 9(3): 266~271
- 2 李劲风, 宁红, 刘丹阳, 等. Al-Cu-Li系铝锂合金的合金化与微合金化[J].

中国有色金属学报, 2021, 31(2): 258~279

- 3 王一唱, 童鑫, 游国强, 等. 铝锂合金组织、性能及成形工艺的研究现状与展望[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(3): 1069~1083
- 4 Abd El-Aty A, Xu Yong, Guo Xunzhong, et al. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al-Li alloys: A review[J]. Journal of Advanced Research, 2018, 10: 49~67
- 5 Yang Yan, Peguet L, Gharbi O, et al. On the corrosion, electrochemistry and microstructure of Al-Cu-Li alloy AA2050 as a function of ageing[J]. Materialia, 2018, 1: 1~12
- 6 杨富强, 熊慧, 任柏峰, 等. 先进铝锂合金的发展及应用[J]. 世界有色金属, 2018(1): 1~5
- 7 Zheng Ziqiao, Huang Bipeng. Effect of heat treatments on tensile properties and microstructure of 2195 alloy[J]. Journal of Central South University of Technology, 1998, 5(1): 14~17
- 8 Nayan N, Narayana Murty S V S, Mukhopadhyay A K, et al. Ambient and cryogenic tensile properties of AA2195T87 sheets with pre-aging cold work by a combination of cold rolling and stretching[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 585: 475~479
- 9 Kim J H, Jeun J H, Chun H J, et al. Effect of precipitates on mechanical properties of AA2195[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 669: 187~198
- 10 Nayan N, Gurao Nilesh P, Narayana Murty S V S, et al. Mechanical properties of aluminium-copper-lithium alloy AA2195 at cryogenic temperatures[J]. Materials & Design, 2014, 58: 445~450
- 11 Nayan N, Narayana Murty S V S, Jha Abhay K, et al. Processing and characterization of Al-Cu-Li alloy AA2195 undergoing scale up production through the vacuum induction melting technique[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 576: 21~28
- 12 Hekmat Ardakan A, Elgallad E M, Ajersch F, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of as-cast and T6-treated AA2195 DC cast alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 558: 76~81
- 13 Wang Liang, Hao Min, Li Guoai, et al. In-situ Investigation of the Fracture Behaviors of 2195-T8 Aluminum-Lithium alloy[J]. MATEC Web of Conferences, 2016, 67: 05028
- 14 朱宏伟. 2195、2050铝锂合金热处理组织及性能研究[D]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2019
- 15 Pu Qingqing, Jia Zhihong, Kong Yaping, et al. Microstructure and mechanical properties of 2195 alloys prepared by traditional casting and spray forming[J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 784: 139337