

固溶温度对 2195 铝锂合金组织与性能的影响

肖代红 王新凯 陈伟斌 刘文胜
(中南大学轻质高强结构材料重点实验室)

摘 要 通过差热分析、组织分析、力学性能试验等方法,研究了不同固溶温度对 2195 铝锂合金显微组织及力学性能的影响。结果表明,固溶处理能够提高铝锂合金的力学性能。随着固溶温度增加,合金中残余 Al₂Cu 相逐渐溶解进入基体,得到最大过饱和度固溶体,实现固溶强化;但固溶温度偏离最佳制度时,促使合金内回复再结晶和过烧情况发生,恶化合金的力学性能。

关键词 铝锂合金;固溶温度;力学性能;微观组织

中图分类号 TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.10.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Solid Solution Temperature on the Microstructure and Properties
of 2195 Al-Li Alloy

Xiao Daihong, Wang Xinkai, Chen Weibing, Liu Wensheng

(National Key Laboratory of Science and Technology on High-strength Structural Materials,
Central South University)

Abstract: The effects of different solid solution temperatures on the microstructure and mechanical properties of 2195 Al-Li alloy were investigated by differential thermal analysis, electron microscopy analysis, and tensile tests. The results indicate that solution treatment can improve the mechanical properties of 2195 alloy. As the solid solution temperature increases, the residual Al₂Cu phase is gradually dissolved into the matrix, leading to the maximum supersaturation solid solution, achieving solid solution strengthening. However, the deviation of solid solution temperature from the optimal system promotes the recovery of recrystallization and over-burn in the alloy, resulting in deterioration of the mechanical properties.

Key Words: Al-Li Alloy, Solid Solution Temperature, Mechanical Properties, Microstructure

收稿日期:2021-05-18

第一作者简介:肖代红,男,1971 年出生,副教授,长沙(410083),E-mail:daihongx@csu.edu.cn

引用格式:肖代红,王新凯,陈伟斌,等. 固溶温度对 2195 铝锂合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(10):1 193-1 196.

XIAO D H, WANG X K, CHEN W B, et al. Effects of solid solution temperature on the microstructure and properties of 2195 Al-Li alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(10):1 193-1 196.

参 考 文 献

[1] CESCHINI L, DAHLE A, GUPTA M, et al. Aluminum and Magnesium Metal Matrix Nanocomposites[M]. Singapore: Springer, 2017.

[2] AKBARI M K, BAHARVANDI H R, SHIRVANIMOGHADD-AM K. Tensile and fracture behavior of nano/micro TiB₂ particle reinforced casting A356 aluminum alloy composites[J]. Materials & Design, 2015, 66: 150-161.

[3] 郝世明, 谢敬佩, 王爱琴, 等. 微米级 SiC 颗粒增强铝基复合材料的强化机制[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(5): 1-6.

[4] RANA R S, PUROHIT R, SONI V K, et al. Characterization of mechanical properties and microstructure of aluminum alloy-SiC composites[J]. Materials Today: Proceedings, 2015, 2(4-5): 1 149-1 156.

[5] 潘飞, 严青松, 芦刚, 等. 超声温度对 ZL114A 合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(11): 1 205-1 208.

[6] 陈小会. 纳米颗粒增强铝基复合材料的制备及其半固态模锻成形研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016.

[7] 胡志, 闫洪, 聂俏, 等. 超声法制备纳米 SiC 颗粒增强 AZ6 镁基复合材料的显微组织[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(5): 841-846.

[8] DING J H, CUI C X, SUN Y J, et al. Microstructures and mechanical properties of in-situ CaB₆ ceramic particles reinforced Al-Cu-Mn composite[J]. Ceramics International, 2019, 45: 21 668-21 675.

[9] 马继宇. 超声空化下 TiN_p/Al 复合材料制备及性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.

[10] KILICLI V, AKAR N, ERDOGAN M, et al. Tensile fracture behavior of AA7075 alloy produced by thixocasting[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc., 2016, 26: 1 222-1 231.

[11] XIA C J, WANG L, ZHANG Q, et al. An investigation of microstructural evolution, tensile properties and work-hardening behavior of nanosized TiB₂/Al-Cu-Mn composites[J]. Materials, 2020, 13: 4 250.

[12] 何广进, 李文珍. 纳米颗粒分布对镁基复合材料强化机制的影响[J]. 复合材料学报, 2013, 30(2): 105-110.

(编辑:彭瑾)

与传统结构材料相比,新型铝锂合金具有低密度、高强度、强韧性、耐腐蚀等特点,在军事、航空航天领域具有广泛的应用前景^[1,2],其中 2195 铝锂合金因其优异性能在航空工业中广泛使用^[3]。为获得具有优异力学性能的铝锂合金,调控其形变热处理工艺具有重要意义。固溶处理通过保温使合金中溶质原子充分溶解于铝基体中形成固溶体,淬火后得到最大过饱和固溶体^[4,5],其中固溶制度对合金的过饱和度及后续时效析出过程等具有显著影响。LIN Y 等^[6]研究表明,固溶温度越高,将使更多溶质原子溶解于基体中得到高过饱和度和固溶体。在后续时效过程中,促进强化相时效析出,提高合金性能。

目前,国内外研究者对铝锂合金固溶处理等工艺进行了广泛的研究,但不同牌号铝锂合金的固溶处理工艺存在较大差异。为优化合金综合性能,揭示固溶过程中合金过饱和度和回复再结晶的演变规律具有积极意义。因此,本课题拟研究不同固溶温度对 2195 铝锂合金微观组织结构和力学性能的影响,旨在为高性能铝锂合金的制备加工提供参考。

1 试验方法

2195 铝锂合金的化学成分为 Al-3.81Cu-1.12Li-0.36Ag-0.36Mg-0.12Zr,合金板材状态为退火态,厚度为 30 mm。差热分析利用 DSC204F1 型热分析仪,测试温度区间为 25~600 ℃,升温速率为 5 ℃/min。根据差热分析数据,确定合金固溶温度区间以及过烧区间。根据 DSC 所测数据,利用程序控温空气循环箱式炉对合金进行固溶处理,固溶过程中控温精度为±1 ℃。

利用拉伸测试对比不同固溶状态下合金的性能差异。采用 Instron3369 型万能电子试验机进行测试,加载速率为 1 mm/min,最终试验结果取 3 个有效试样数据的平均值。试样沿着板材 L 方向加工,尺寸为 80 mm×6 mm×2 mm。

采用 Quanta 250 扫描电镜进行组织观察,根据测试结果分析其形貌特点;借助能谱探头(EDS, OXFORD)分析残余结晶相元素组成。利用电子背散射衍射测试(EBSD)分析合金板材回复再结晶演变规律。选取一定晶体方向作为参考,通过晶粒取向分布(IPF)图来计算再结晶、变形结构、亚结构的占比及分布情况。

2 试验结果与分析

2.1 差热分析

图 1 为 2195 铝锂合金轧制态原始板材试样差热分

析测试曲线。可以看出,合金在 200~600 ℃ 范围内出现 3 个吸热峰,分别为 437、502、572 ℃,每个特征峰对应合金中低熔点共晶相的熔化温度。合金过烧温度区间为 555~574 ℃。为了防止合金在固溶过程中发生过烧,且考虑到差热分析所得到数据与实际固溶过程中存在一定差异,导致“温度滞后”效应产生,固溶温度必须低于其过烧温度。因此,2195 铝锂合金适宜的固溶温度区间为 440~560 ℃^[7]。

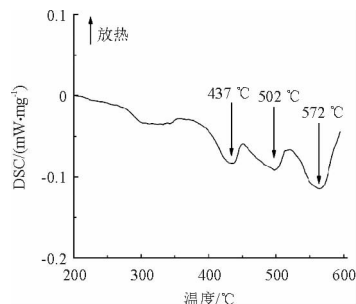


图 1 2195 铝锂合金板材 DSC 曲线

Fig.1 The DSC curve of 2195 Al-Li alloy sheet

2.2 结晶相

图 2 为 2195 铝锂合金分别在不同固溶温度下固溶处理 1 h 后的微观组织。当固溶温度为 440 ℃ 时(见图 2a),合金中有大量白色粒子,数量多且聚集程度较高。温度升高到 470 ℃ 时(见图 2c),残余结晶相明显减

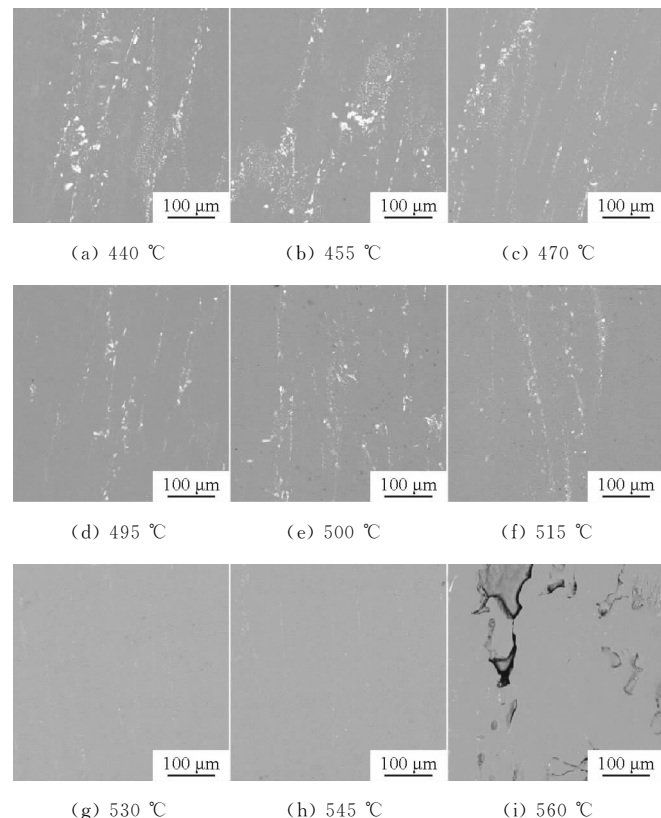


图 2 不同固溶温度下 2195 铝锂合金微观组织形貌

Fig.2 Effect of solution temperature on the microstructure of 2195 Al-Li alloy

少。与 440 ℃ 时相比,530 ℃ 固溶合金残余第二相聚集现象基本消失,分布更加弥散均匀(见图 2g)。继续增加至 545 ℃ 时(见图 2h),合金中残余第二相无变化,表明 530 ℃ 时合金达到最大固溶度。但固溶温度达到 560 ℃ 时(见图 2i),合金发生过烧现象,出现大量过烧

裂纹与孔洞。通过对第二相粒子进行能谱分析发现,主要成分为 Al_2Cu 相(见图 3)。综上,随着固溶温度提高,合金残余 Al_2Cu 结晶相逐渐溶解且聚集现象减少,固溶饱和度增加,但固溶温度增加至临界温度时,合金发生过烧。

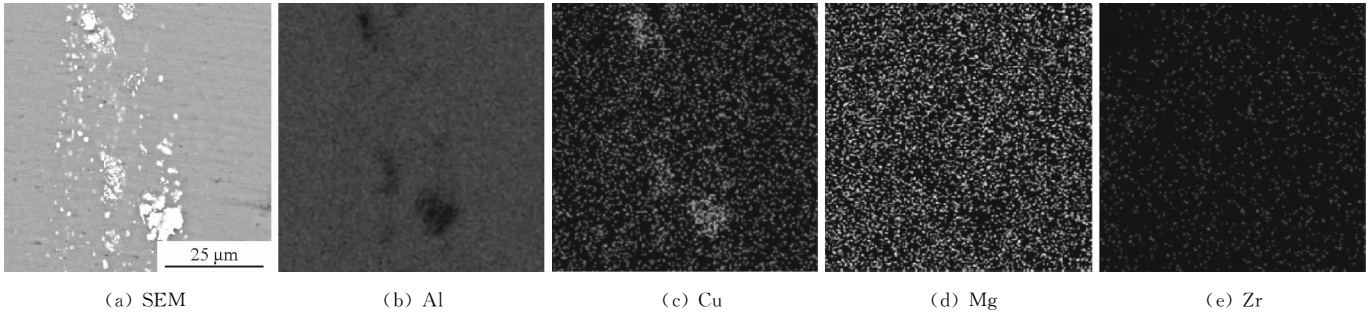


图 3 结晶相成分分析

Fig.3 The composition analysis of secondary phase

2.3 回复再结晶

固溶温度对 2195 铝锂合金回复再结晶的影响见图

4。图 4a 和图 4d 分别为合金在 495 ℃ 和 545 ℃ 下保温 1 h 后的组织形貌,可以明显观察到随固溶温度提高,

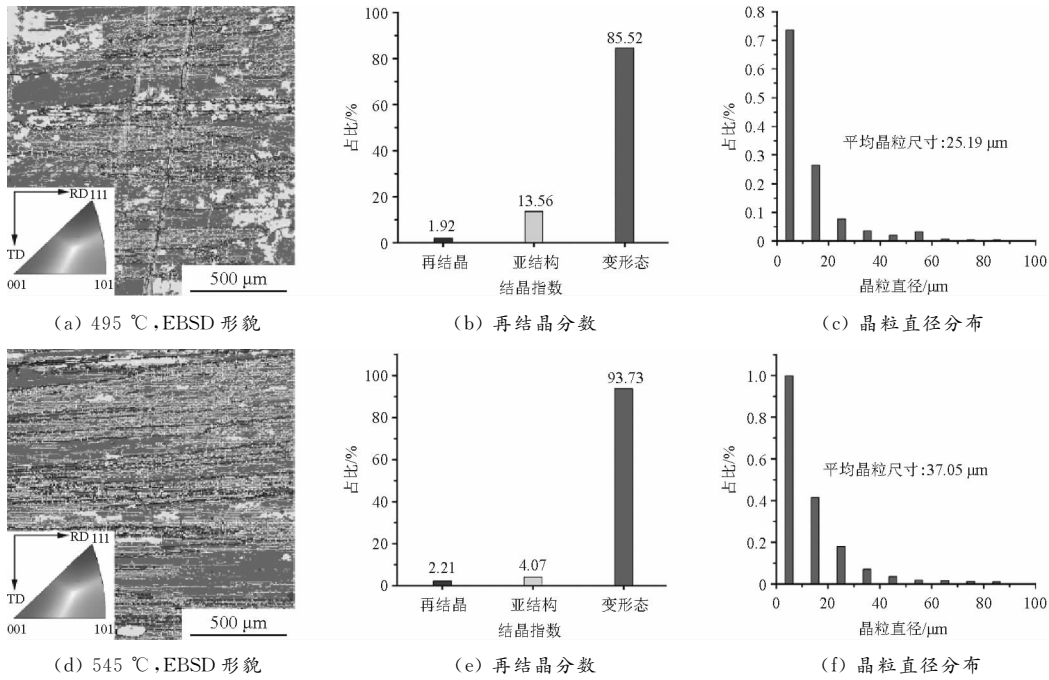


图 4 固溶温度对 2195 铝锂合金回复再结晶的影响

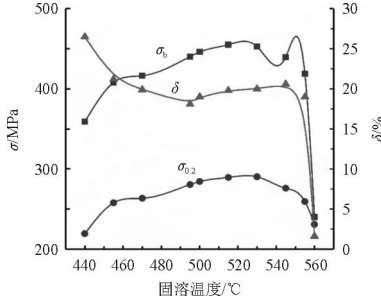
Fig.4 Effect of solid solution temperature on the recrystallization of 2195 Al-Li alloy

合金内部组织产生明显变化。当固溶温度为 495 ℃ 时(见图 4a~图 4c),合金组织再结晶指数为 1.92%,亚结构指数为 13.56%,平均晶粒尺寸为 25.19 μm 。随固溶温度升高至 545 ℃ (图 4d~图 4f),再结晶组织指数增加至 2.21%,而亚结构指数降低至 4.07%,晶界宽化且平均晶粒尺寸显著增加至 37.05 μm ,表明合金内大量亚结构组织因固溶温度升高促进回复再结晶发生^[8,9]。

2.4 力学性能

图 5 为不同固溶温度处理后 2195 铝锂合金的力学性能。可以看出,440 ℃ 固溶后的合金抗拉强度 σ_b 为

图 5 固溶温度对 2195 铝锂合金力学性能的影响
Fig.5 Effect of solid solution temperature on the tensile properties of 2195 Al-Li alloy



358 MPa;提高固溶温度, σ_b 与屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 增加,到 515 °C 时, σ_b 达到 455 MPa, $\sigma_{0.2}$ 达到 289 MPa,进一步升温到 530 °C, σ_b 与 $\sigma_{0.2}$ 无明显增加,表明固溶强化达到最大值。当固溶温度分别提高到 545、555、560 °C 时,强度降低。上述结果表明,随着固溶温度升高,合金抗拉强度和伸长率前期变化保持在一定区间内,但增加至临界温度时,二者显著降低。

2.5 断口形貌

图 6 为不同固溶温度处理后 2195 合金的断口形貌。可以看出,固溶温度为 495 °C 时(见图 6a),合金断口存在大量韧窝,韧窝均匀分布,表现为韧窝-韧性断裂

模式,且存在大量粗大第二相颗粒。530 °C 时固溶合金断口显示,韧性断裂特征增加,第二相颗粒数量减少,表明合金塑性增加(见图 6b)。固溶温度提高至 545 °C (见图 6c),断口内韧窝体积分数降低,且在断口内部观察到少量沿晶断裂特征,表明合金塑性降低。进一步提高固溶温度至 560 °C,断口内分层特征显著增加,此时断裂模式表现为沿晶-脆性断裂模式(见图 6d)。上述结果表明,经不同固溶温度处理后,合金断口呈混合断裂的特征。固溶温度升高,合金断裂模式由韧窝-韧性断裂逐渐向沿晶-脆性断裂模式转变。为获得良好的强塑性匹配,应严格控制固溶温度区间^[10]。

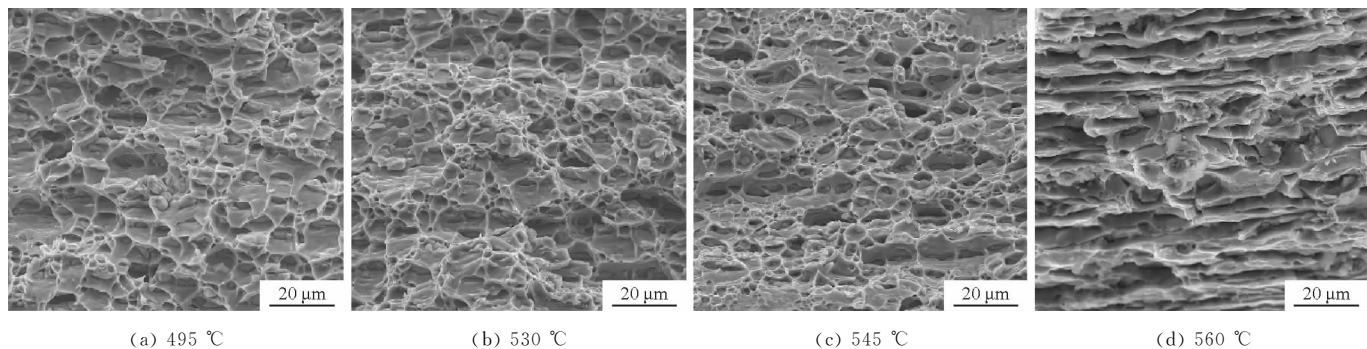


图 6 不同固溶温度下 2195 铝锂合金断口形貌

Fig.6 Effect of solid solution temperature on the fracture morphologies of 2195 Al-Li alloy

固溶温度影响合金组织性能的原因在于:①提高固溶温度能够加快 Cu 原子的扩散速度,迫使残余结晶相 Al_2Cu 中的 Cu 原子溶解到基体晶格中引起畸变并产生应力场,该应力场与位错周围应力场发生强烈交互作用,促使溶质原子向刃型位错线附近聚集而形成柯氏气团,阻碍位错滑移从而增加其性能^[11];②由扩散动力学可知,固溶温度增加可使扩散更加充分,促使残余结晶 Al_2Cu 相逐渐溶解到基体中,从而得到过饱和度大以及均匀性高的固溶体,增加固溶强化效果;③根据 Hall-Petch 公式可知,增加固溶温度促使回复再结晶发生,导致晶粒长大,造成合金性能下降^[8,9];④当固溶温度升高至临界温度时,晶界低熔点残余结晶相溶解并发生过烧现象,导致晶界强度降低,从而在变形过程中晶界提前断裂,造成合金性能急剧恶化^[12]。

3 结 论

(1)当固溶参数为 530 °C×1 h 时,2195 合金残余 Al_2Cu 结晶相溶解于基体中得到最大过饱和固溶体,实现固溶强化。此时,2195 合金抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 453 MPa、290 MPa、20.0%。

(2)偏离最佳固溶参数时,再结晶程度加剧且存在过烧现象,降低 2195 合金的力学性能。560 °C×1 h 时,2195 合金抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 240 MPa、231 MPa、1.6%。

参 考 文 献

- [1] MILLER W S, ZHUANG L, BOTTEMA J, et al. Recent development in aluminum alloys for the automotive industry[J]. Materials Science and Engineering, 2000, A280(1): 37-49.
- [2] SIDDQUI R A, ABDULLAH H A, AL-BELUSHI K R. Influence of aging parameters on the mechanical properties of 6063 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 102 (1-3): 234-240.
- [3] 马云龙,李劲风,刘观日,等.重固溶-不同温度 T8 再时效 2195Al-Li 合金的力学性能与显微组织演化[J].中国有色金属学报,2017, 27(2): 234-242.
- [4] DORWARD R C. Solidus and solvus isotherms for quaternary Al-Li-Cu-Mg alloys[J]. Metallurgical Transactions, 1988, A19(6): 1 631-1 634.
- [5] 邓桢桢,郭世杰,纪艳丽,等.不同固溶制度对 6082 铝合金力学性能和腐蚀性能的影响[J].材料热处理学报,2021, 42(3): 64-72.
- [6] LIN Y, ZHENG Z Q, LI S C. Effect of solution treatment on microstructures and mechanical properties of 2099 Al-Li alloy[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2014, 14(1): 61-71.
- [7] 刘全升,范梦婷,罗欣然.固溶和时效处理对加压成形 6063 铝合金组织与性能的影响[J].机械工程材料,2021, 45(1): 66-72.
- [8] 李民,李云,徐玉国,等.固溶处理对 7B04 铝合金冷轧板组织性能的影响[J].金属热处理,2020, 45(9): 105-110.
- [9] 李华冠,陶杰,孙中刚,等.固溶处理对新型铝锂合金组织和性能的影响[J].金属热处理,2013, 38(3): 74-76.
- [10] 蔡红,岳忠,项红岩,等.固溶温度对 2A50 铝合金组织与性能的影响[J].轻合金加工技术,2020, 48(10): 51-55.
- [11] 王华春,黄淑萍,何克准,等.固溶处理对 2A14 铝合金冷轧板组织与性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2020, 40(7): 731-734.
- [12] 田秀文,杜洪增,王毅,等.2024 铝合金的一种新时效制度[J].材料科学与工艺,2000, 8(3): 6-11.

(编辑:彭瑾)