DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4184

时效制度对 SLM 成形 2196 铝锂合金组织与力学性能的影响

李雪萍[1,2],王　前[1,2],沈宇凡[1,2],王亚光[1,2],咸舒凡[1,2],王　猛[1,2]

(1. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室,陕西 西安 710072; 2. 西北工业大学 金属高性能增材制造与创新设计工业和信息化部重点实验室,陕西 西安 710072)

摘　要:铝锂合金在航空航天构件制备中应用潜力巨大。激光选区熔化成形(SLM)技术在复杂轻量化结构整体成形方面具备独特优势,但 SLM 直接成形的铝锂合金力学性能较低,需要通过热处理优化其力学性能。本文研究了 T6 时效和双级时效制度对 SLM 成形 2196 铝锂合金组织性能的影响。结果表明, 170 ℃/36 h(T6)时效处理后,在纳米 $T_1(Al_2CuLi)$强化相的作用下,强度大大提高,但断后伸长率明显下降; 130 ℃/6 h+170 ℃/24 h 时效处理后,T_1 相尺寸更小,数密度更高,强度和断后伸长率均高于 T6 态;170 ℃/36 h+115 ℃/4 h 时效处理后,合金中额外形成了大量原子团簇,在保持断后伸长率的同时,强度再次提高。

关键词:激光选区熔化;2196 铝锂合金;T6 时效;双级时效;$T_1(Al_2CuLi)$相

中图分类号: TG146.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)12-1138-07

Effect of the Aging Process on the Microstructure and Mechanical Properties of 2196 Al–Li Alloy Fabricated via Selective Laser Melting

LI Xueping[1,2], WANG Qian[1,2], SHEN Yufan[1,2], WANG Yaguang[1,2], XIAN Shufan[1,2], WANG Meng[1,2]

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. MIIT Key Laboratory of High Performance Additive Manufacturing and Innovative Design of Metal Structure, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Aluminium-lithium alloys have great application potential in aerospace component preparation. Selective laser melting (SLM) technology has unique advantages in the integral formation of complex and lightweight structures, but the mechanical properties of Al-Li alloys formed by SLM directly are poor, requiring heat treatment to maximize their mechanical properties. This study examined the impact of T6 treatment and double-stage aging on the microstructure and properties of a 2196 Al-Li alloy built via SLM. The results demonstrate that after 170 ℃/36 h (T6) aging treatment, the strength is greatly improved because of the precipitation of nano-$T_1(Al_2CuLi)$, but the elongation decreases dramatically. After the 130 ℃/6 h+170 ℃/24 h aging treatment, the samples show both greater strength and elongation than those in the T6 state because of the smaller size and higher number density of the T_1 phase. After the 170 ℃/36 h+115 ℃/4 h aging treatment, a large number of additional atomic clusters form in the alloy, and the strength increases again while the elongation is maintained at the same level.

Key words: selective laser melting; 2196 Al-Li alloy; T6 aging; double-stage aging; $T_1(Al_2CuLi)$ phase

铝锂合金凭借其低密度、高弹性模量及高比强度等综合性能,在航空航天领域有极大应用潜力,可用于制备飞机地板梁、机身长桁等关键承力构件[1-2]。随着航空航天飞行器的结构逐渐趋向于复杂化和整体化,铸造、挤压等传统成形工艺在制备铝锂合金构件时面临着制造工序复杂,加工流程长等问题。而具

收稿日期:2024-09-24

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB4602301);国家自然科学基金(52275381);陕西省“双链融合”增材制造重点专项(2021LLRH-08)

作者简介:李雪萍,2001 年生,硕士生. 研究方向为金属增材制造. Email: lixueping@mail.nwpu.edu.cn

通讯作者:王　猛,1976 年生,博士,教授. 研究方向为金属增材制造. Email: wangmeng@nwpu.edu.cn

引用格式:李雪萍,王前,沈宇凡,王亚光,咸舒凡,王猛. 时效制度对 SLM 成形 2196 铝锂合金组织与力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2024, 45(12): 1138-1144.

LI X P, WANG Q, SHEN Y F, WANG Y G, XIAN S F, WANG M. Effect of the aging process on the microstructure and mechanical properties of 2196 Al-Li alloy fabricated via selective laser melting[J]. Foundry Technology, 2024, 45(12): 1138-1144.

中国知网　https://www.cnki.net

有较高成形自由度能力的激光选区熔化成形(selective laser melting, SLM)技术则为这类问题提供了解决之道，结合结构的优化设计，可以同时实现材料减重和结构减重[3-4]。然而，由于铝锂合金凝固温度区间较宽，在成形过程中极易出现裂纹缺陷，研究表明，通过向合金中添加一定量的 Sc、Zr 或 Ti 元素，有助于抑制裂纹，提高 SLM 成形铝锂合金的致密度[5-7]。

铝锂合金是一种典型的可热处理强化合金。目前，针对铝锂合金常用的热处理工艺为 T6 热处理，即通过高温固溶+低温时效的方法促进强化相析出，从而优化合金性能[8-9]。在以 2195、2196 为代表的第Ⅲ代铝锂合金中，主要析出相有 T_1(Al_2CuLi)相、θ′(Al_2Cu)相和 δ′(Al_3Li)相等[10]。Chen 等[11]采用 515 ℃/90 min+170 ℃/36 h 的 T6 热处理工艺对挤压成形 2196 铝锂合金进行了热处理，利用 T_1 相和 θ′相的强化作用将合金的屈服强度由挤压态下的 254 MPa 提高至 451 MPa，但是伸长率由 10.7%降低到了 9.1%。Qi 等[12]对 SLM 2195 铝锂合金进行了 T6 热处理(520 ℃/60 min+170 ℃/6 h)，结果表明，热处理前沉积态合金的屈服强度为208 MPa，伸长率为17.2%；T6 热处理后，基体中析出大量 T_1 相，屈服强度显著提高至 521 MPa，但伸长率降低为6.9%。

虽然 T6 热处理制度可有效提高铝锂合金的强度，但会造成塑性明显下降。为解决这一问题，有研究者[13-16]提出双级时效制度，包括先低温后高温和先高温后低温两种时效工艺，并在铸造铝锂合金的组织性能调控中进行了尝试。梁文杰等[15]研究发现，经 120 ℃/2 h+160 ℃/24 h 热处理后，铸造 Al-3.5Cu-1.5Li 合金强度与 T6 态相当，且其伸长率由 6.1%提高到 7.2%。Li 等[16]研究了两种不同双级时效制度对铸造 Al-3.7Cu-1.5Li 合金组织与性能的影响，对合金进行 150 ℃/24 h+180 ℃/12 h 先低温后高温双级时效处理后，相较于 T6 态，合金在保持高强度的同时，伸长率由 12.0%提高到了14.0%，而对合金进行 165 ℃/36 h+130 ℃/48 h 先高温后低温时效处理后，不仅合金的屈服强度由 453 MPa 提高到 470 MPa，伸长率也由 12.0%提高到了13.0%。

对于 SLM 成形铝锂合金而言，由于涉及到熔池的快速凝固及沉积层多道次热循环效应，其组织和相构成与铸造铝锂合金存在差异[17-18]，相关强塑性调控机制的厘清和热处理制度的探索还有待于开展。因此，本文以 SLM 成形的 2196 铝锂合金为研究对象，在 Ti 元素改性的基础上，考察 T6 时效和双级时效热处理制度对组织演变和力学性能的影响规律和机制。

1　实验材料与方法

实验所用 Ti 改性 2196 铝锂合金粉末由长沙智启新材料公司以气雾化法制备，粒径 15~53 μm，采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)检测其化学成分，结果如表 1 所示。使用 BLT-S210 设备制备 2196 铝锂合金块状试样，成形参数如表 2 所示。沉积态试样经 560 ℃保温 90 min 后水淬，得到固溶态试样，并进行单级时效、先低温后高温双级时效与先高温后低温双级时效 3 类热处理制度的筛选。结合不同热处理制度下合金显微硬度的变化趋势，优化出的单级时效制度为 170 ℃/36 h，此时试样的硬度值为(152.4±2.1) HV；先低温后高温双级时效制度为 130 ℃/6 h+170 ℃/24 h，此时试样的硬度值提高为(158.6±1.6) HV；先高温后低温双级时效制度为 170 ℃/36 h+115 ℃/4 h，此时试样的硬度值提高为(166.8±1.2) HV。为了便于简述，后面将先低温后高温双级时效态表示为 DTA-1 态；先高温后低温双级时效态表示为 DTA-2 态。

表1　Ti–2196铝锂合金化学成分
Tab.1 Chemical composition of the Ti–2196 Al–Li alloy
(mass fraction/%)

Element	Li	Cu	Mg	Ag	Zn	Zr	Ti	Al
Content	1.53	2.65	0.28	0.42	0.25	0.10	0.81	Bal.

表 2 SLM 成形工艺参数
Tab.2 Parameters applied in the SLM process

Processing parameters	Values
Laser power, *P*	120 W
Scanning speed, *V*	400 mm/s
Hatch spacing, *h*	0.100 mm
Layer thickness, *t*	0.030 mm
Scanning strategy	Zigzag
Hatch rotation angle	67°

在 Instron-3382 电子万能试验机上进行室温拉伸性能测试，拉伸速率为 1 mm/min，拉伸方向与试样沉积方向垂直。采用 FEI Themis 双球差校正透射电子显微镜对沉积态和不同热处理态试样进行透射观察。透射试样采用如下步骤制备：利用电火花切割出厚度为 0.8 mm 的薄片后，采用 1000# 砂纸将薄片厚度研磨至 50 μm 左右，再通过 Gatan PIPS-695 型离子减薄仪研磨制备用于 TEM 表征的薄区。

2　实验结果及讨论

2.1　沉积态与固溶态试样组织与性能

2.1.1　沉积态组织与性能

在 TEM 下观察沉积态试样，可见大量微米级共晶相及方形相，如图 1a 所示。图 1b 能谱分析表

中国知网　https://www.cnki.net

明，共晶相中 Cu 元素富集，判断共晶相可能为 Al_2Cu 相；方形相中 Ti 元素富集，判断为初生 β′(Al_3Ti)相，该相可以促进晶粒细化，达到抑制裂纹的效果。如图 1c 所示还存在少量针状相，根据图 2 给出的铝锂合金沿 $<110>_\alpha$ 和 $<100>_\alpha$ 晶带轴衍射花样标准图，结合图 1d，判断该针状析出相为 T_1 相，推测该相与试样成形过程中沉积层多道次热循环效应过程有关[17-18]。由于纳米级析出相较少，强化效应有限，因此试样屈服强度和抗拉强度较低，分别为(274.3±1.5) MPa 和(364.2±4.1) MPa，但断后伸长率较高，达到 19.6%±0.5%(图 3)。

2.1.2 固溶态组织与性能

图 4 为经 560 ℃/90 min 固溶处理后试样的微观组织。图 4a 为固溶态试样在 $<110>_\alpha$ 晶带轴下的微观组织，可以看出，经固溶处理之后，T_1 相全部溶解，而初生 β′相由于熔点高而保留，试样内部有大量位错形成。HAADF 图像中未发现析出相，但在 $\{100\}_\alpha$ 平面上观察到一些白色针状团簇 (图 4b)，根据文献中关于 Al-Cu 合金的报道[19-20]，这些团簇可能为富 Cu 团簇。虽然没有观察到其他析出物，但图 4c 在 $1/2\{200\}_\alpha$ 和 $1/2\{220\}_\alpha$ 位置显示出了超晶格斑点，表明铝锂合金中存在 $L1_2$ 型的析出相，考虑到初生 β′相的尺寸较大，不会在衍射斑点中呈现出来，推断这些斑点与富含 Li 的有序结构有关，Neibecker 等[21]在淬火后的铝锂合金自然时效过程中观察到相似的有序结构，但并未形成 δ′相。由于溶质原子回溶进铝基体中，增加了基体中合金化元素的过饱和度，增强固溶强化效果，试样的屈服强度、抗拉强度和断后伸长率分别提高至(303.9±5.4) MPa、(429.6±4.3) MPa、20.5%±2.4%。

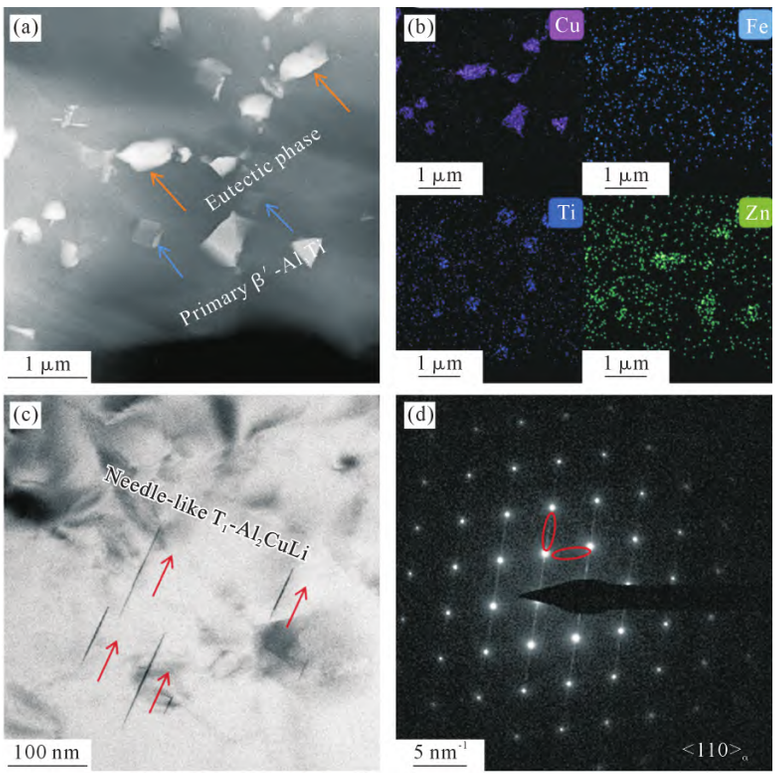

图 1 沉积态试样微观组织：(a) 形貌；(b) 图 a EDS 图；(c) 晶内针状 $T_1(Al_2CuLi)$相；(d) T_1 相衍射花样

Fig.1 Microstructure of the as-built samples: (a) morphology; (b) EDS of (a); (c) intragranular needle-like $T_1(Al_2CuLi)$ phase; (d) SAED patterns of T_1

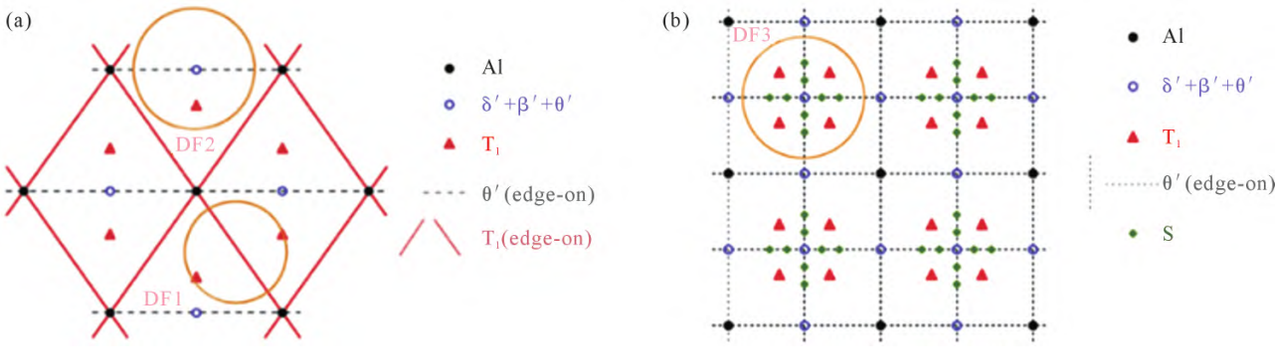

图 2 铝锂合金中主要析出相的标准衍射花样：(a) $<110>_\alpha$；(b) $<100>_\alpha$[10]

Fig.2 SAED patterns of the main precipitates phase in Al-Li alloys: (a) $<110>_\alpha$; (b) $<100>_\alpha$[10]

中国知网 https://www.cnki.net

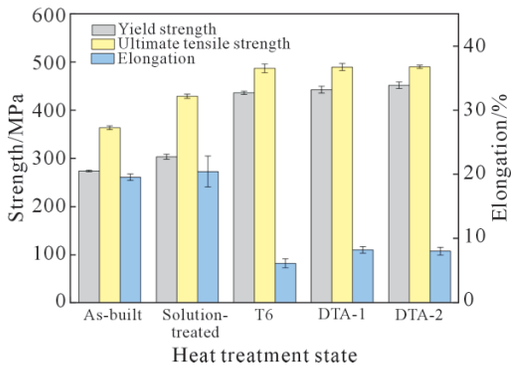

图 3 不同热处理状态下 2196 铝锂合金力学性能

Fig.3 Mechanical properties of 2196 Al-Li alloy in different heat treatment states

2.2 不同热处理制度下的试样组织和性能

2.2.1 T6 时效

图 5 为 T6(170 ℃/36 h)时效态试样的显微组织。图 5a 和 b 分别为沿 <100>$_\alpha$ 晶带轴观察到的显微组织及衍射斑点图，图 5c 和 d 分别为沿 <110>$_\alpha$ 晶带轴观察到的显微组织及衍射斑点图。可以发现，T6 时效态试样内部存在大量针状相、白色衬度的球形相、黑色衬度的球形相，同时还有少量白色点状相和方形相。参考图 2 铝锂合金中主要析出相的标准衍射斑点，判断{111}$_\alpha$ 晶面上析出的针状相为 T_1 相，{100}$_\alpha$ 晶面上析出的针状相为 θ′相，点状相为 S′(Al_2CuMg)相[10]。图 5f 为图 5e 中紫色方框内的方形相的放大图，根据 EDS 分析，方形相内富含 Cu 元素，Mg 元素略有富集，判断该相可能为Pm^3 结构的 σ($Al_6Cu_5Mg_2$)相[10]。图 5g 为图 5e 中浅黄色方框内的球形相的放大图，根据 EDS 分析，白色衬度的球形相富含 Ti 元素，为次生 β′相，黑色衬度的球形相为 δ′相。δ′相周围包裹次生 β′相，形成 Al_3(Li, Ti)复合结

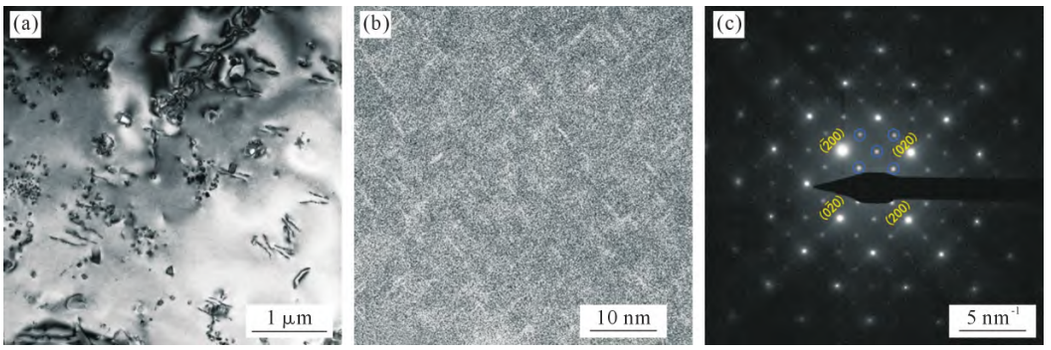

图 4 固溶态试样微观组织：(a) <110>$_\alpha$ 晶带轴下微观组织；(b) 基体中富 Cu 团簇；(c) 沿 <100>$_\alpha$ 晶带轴衍射花样

Fig.4 Microstructure of solution-treated sample: (a) microstructure under <110>$_\alpha$ zone axis; (b) Cu-rich clusters in matrix; (c) SAED patterns along <100>$_\alpha$ zone axis

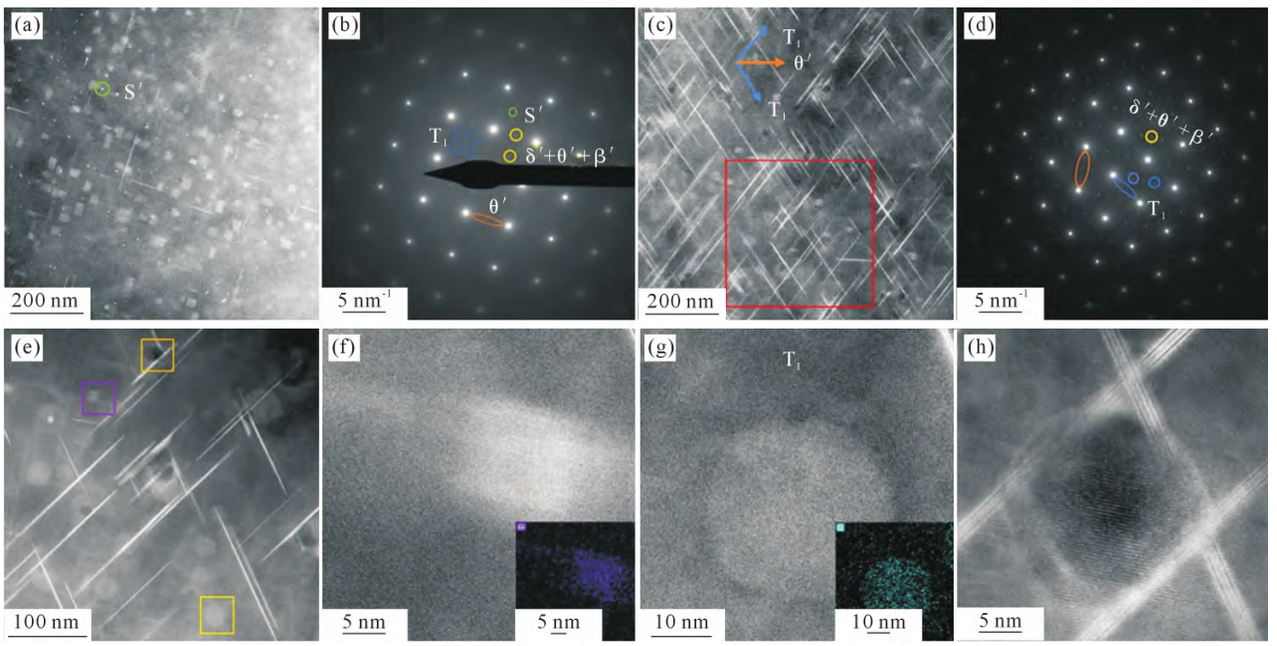

图 5 T6 时效态试样微观组织：(a) <100>$_\alpha$ 晶带轴下微观组织；(b) 沿 <100>$_\alpha$ 晶带轴衍射花样；(c) <110>$_\alpha$ 晶带轴下微观组织；(d) 沿 <110>$_\alpha$ 晶带轴衍射花样；(e) 图(c)放大图；(f) σ($Al_6Cu_5Mg_2$)相放大图；(g) β′(Al_3Ti)相放大图；(h) Al_3(Li, Ti)复合结构放大图

Fig.5 Microstructure of T6 sample: (a) microstructure under <100>$_\alpha$ zone axis; (b) SAED patterns along <100>$_\alpha$ zone axis; (c) microstructure under <110>$_\alpha$ zone axis; (d) SAED patterns along <110>$_\alpha$ zone axis; (e) enlarged view of (c); (f) enlargement of σ($Al_6Cu_5Mg_2$) phase; (g) enlargement of β′(Al_3Ti) phase; (h) enlargement of Al_3(Li, Ti) composite structure

中国知网 https://www.cnki.net

构,如图 5h 所示。由于针状相对合金强度贡献较大[22],采用 Image J 统计其平均尺寸及其数密度,170 ℃/36 h 单级时效下,θ′相和 T_1 相平均尺寸分别为(55.31±32.18) nm 和(110.71±61.63) nm,数密度分别为 36 个/μm² 及 228 个/μm²(图 6)。正是由于大量析出相的存在,T6 时效态试样的强度得到明显提升,其屈服强度、抗拉强度分别提高到了(436.6±3.4) MPa、(487.5±9.0) MPa,但断后伸长率大大损失,降低为 6.2%±0.7%(图 3)。

2.2.2 先低温后高温双级时效

图 7 为试样经先低温后高温双级时效(DTA-1)处理后的显微组织。由图 7a 可见,经 130 ℃预时效 6 h 后,试样中首先形成了富 Cu 团簇以及 GP 区,再经 170 ℃二次时效 24 h 后,如图 7b 和 c 所示,试样内部析出大量针状相;析出相种类与 T6 时效下相似,但尺寸及数密度有所不同。根据统计结果,先低温后高温时效态下试样内部 θ′相的平均尺寸和数密度分别为(75.48±32.76) nm 和 45 个/μm²,而 T_1 相的平均尺寸降低为(104.18±52.74) nm,数密度升高到 240 个 /μm²,这是因为低温预时效形成大量富 Cu 团簇及 GP 区,随着二次高温时效的进行,溶质原子扩散,GP 区和富 Cu 团簇可作为 θ′相的前驱体,促进 θ′相的析出。同时,当 Mg 和 Ag 原子扩散富集到 GP 区和富 Cu 团簇处时,GP 区和富 Cu 团簇也可作为形核质点促进 T_1 相的析出,相较于 T6 时效态,θ′相和 T_1 相的数密度得到提高。而小尺寸高密度 T_1 相的析出是导致试样力学性能提升的主要原因[23-24],相较于 T6 时效态试样,先低温后高温时效态试样的屈服强度、抗拉强度和断后伸长率均有所提升,分别为(443.1±7.1) MPa、(490.1±7.3) MPa、8.3%±0.5%。

2.2.3 先高温后低温双级时效

图 8 为试样经先高温后低温双级时效(DTA-2)处理后的显微组织,在 T6 时效(170 ℃/36 h)的基础上,再进行 115 ℃/4 h 的低温二次处理。由图 8 可知,试样内部的析出相种类与前面所述两种时效状态下的析出相种类相似,但析出相尺寸及数密度有所不同。图 6 显示,相较于 T6 时效,先高温后低温时效态下试样内部 θ′相的平均尺寸和数密度均提高,分别为(65.93±26.85) nm 和 47 个 /μm², T_1 相的平均尺寸稍有增大,为(114.40±66.37) nm,数密度提高为 234 个 /μm²,这是由于在高温时效后再对试样进行低温时效可以减缓已析出相的粗化,同时由于时效温度降低,固溶体的相对饱和度提高,还会析出大量细小弥散 δ′相、针状相以及溶质原子团簇,会消耗 Li 原子并增加晶内空位浓度,为 θ′相和 T_1 相的析出提供了更多的形核点[14,16]。正是由于大量细小弥

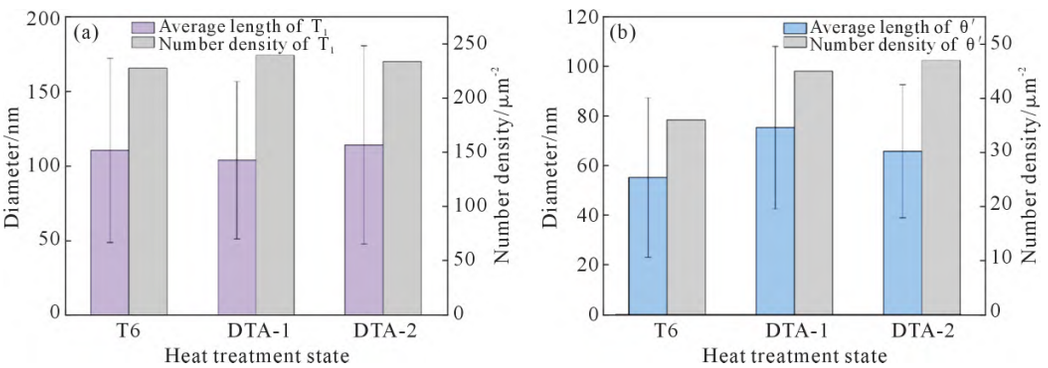

图 6 不同时效制度下析出相平均尺寸及数密度的统计:(a) T_1 相;(b) θ′相

Fig.6 Statistics of the average size and number density of precipitated phases under different heat treatment states: (a) T_1 phase; (b) θ′ phase

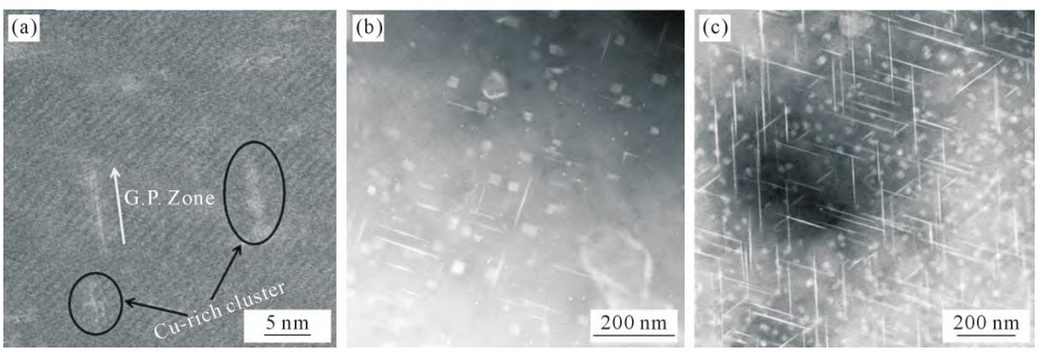

图 7 DTA-1 态试样微观组织:(a) 基体中富 Cu 团簇及 GP 区;(b) <100>$_\alpha$ 晶带轴下微观组织;(c) <110>$_\alpha$ 晶带轴下微观组织

Fig.7 Microstructure of DTA-1 sample: (a) Cu-rich clusters and GP zone in matrix; (b) microstructure under <100>$_\alpha$ zone axis; (c) microstructure under <110>$_\alpha$ zone axis

中国知网 https://www.cnki.net

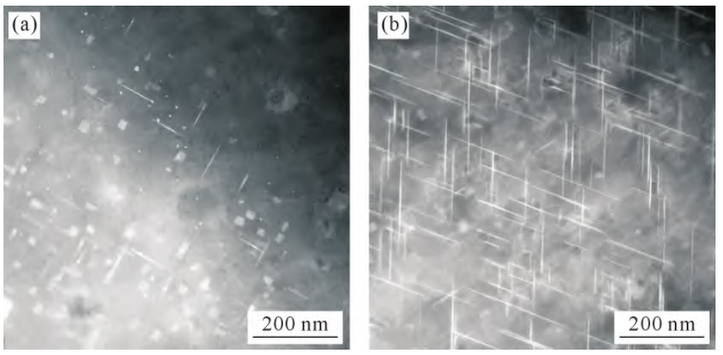

图 8 DTA-2 态试样微观组织：(a) <100>$_\alpha$ 晶带轴下微观组织；(b) <110>$_\alpha$ 晶带轴下微观组织

Fig.8 Microstructure of DTA-2 sample: (a) microstructure under <100>$_\alpha$ zone axis; (b) microstructure under <110>$_\alpha$ zone axis

散的针状相、δ′相和溶质原子团簇的形成，大大提高了试样的强度。如图 3 所示，先高温后低温态试样的屈服强度、抗拉强度和断后伸长率分别为(452.3±6.9) MPa、(490.7±3.5) MPa、8.1%±0.6%。相较于 T6 时效态试样，先高温后低温双级时效态试样的力学性能均明显提升；相较于先低温后高温双级时效态试样，先高温后低温双级时效态试样在保持试样断后伸长率的同时，屈服强度有所提升。

3 结论

(1)沉积态试样内部存在少量纳米级析出相，试样的屈服强度、抗拉强度和断后伸长率分别为(274.3±1.5) MPa、(364.2±4.1) MPa、19.6%±0.5%。经固溶处理，基体过饱和度增大，固溶强化效果提升，试样屈服强度、抗拉强度和断后伸长率分别提高至(303.9±5.4) MPa、(429.6±4.3) MPa、20.5%±2.4%。

(2)经 170 ℃/36 h 的 T6 时效处理后，试样内部形成大量析出相，在针状 T_1 相的强化作用下，试样强度大大提高，但断后伸长率下降，屈服强度、抗拉强度和断后伸长率分别为(436.6±3.4) MPa、(487.5±9.0) MPa、6.2%±0.7%。

(3)试样经 130 ℃/6 h+170 ℃/24 h的先低温后高温双级时效处理后，由于试样在低温预时效过程中形成了大量富 Cu 团簇与 GP 区，高温二次时效过程中析出的 T_1 相尺寸更小、数密度更高，屈服强度、抗拉强度和断后伸长率均高于 T6 时效态，分别为(443.1±7.1) MPa、(490.1±7.3) MPa、8.3%±0.5%。

(4)试样经 170 ℃/36 h+115 ℃/4 h 的先高温后低温双级时效处理后，试样在保持断后伸长率的同时强度提升，屈服强度、抗拉强度和断后伸长率分别为(452.3±6.9) MPa、(490.7±3.5) MPa、8.1%±0.6%。

参考文献：

[1] DORIN T, VAHID A, LAMB J. Aluminium lithium alloys[M]//LUMLEY R N. Fundamental of Aluminium Metallurgy. Duxford: Woodhead Publishing, 2018: 387-438.

[2] DURSUN T, SOUTIS C. Recent developments in advanced air craft aluminium alloys[J]. Materials & Design, 2014, 56: 862-871.

[3] HAJJIOUI E A, BOUCHAÂLA K, FAQIR M, ESSADIQI E. A review of manufacturing processes, mechanical properties and precipitations for aluminum lithium alloys used in aeronautic applications[J]. Heliyon, 2023, 9(3): e12565.

[4] DIXIT S, LIU S Y. Laser additive manufacturing of high-strength aluminum alloys: Challenges and strategies[J]. Journal of Materials and Manufacturing Process, 2022, 6(6): 156.

[5] PATEL D, PANDEY A. Powder bed fusion of aluminium alloys: A review of experimental explorations-microstructure, mechanical properties, and recent advances[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 82: 168-177.

[6] 张新瑞. 2195 铝锂合金激光选区熔化成形及裂纹缺陷调控[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2020.
ZHANG X R. Selective laser melting of AA2195 Al-Li alloy and crack deffct control[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[7] TAN Q Y, ZHANG J Q, SUN Q, FAN Z Q, LI G, YIN Y, LIU Y G, ZHANG M X. Inoculation treatment of an additively manufactured 2024 aluminium alloy with titanium nanoparticles[J]. Acta Materialia, 2020, 196: 1-16.

[8] HAJJIOUI E A, FAQIR M, BOUCHA ÂLA K, ESSADIQI E, MALKI M. A review on heat treatment factor and precipitations to improve the third generation of aluminum lithium alloys used in aeronautic applications[J]. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 2022, 95(1): 85-98.

[9] RAFFEIS I, ADJEI-KYEREMEH F, VROOMEN U, RICHTER S, BÜHRIG-POLACZEK A. Characterising the microstructure of an additively built Al-Cu-Li alloy[J]. Materials, 2020, 13(22): 5188.

[10] ZHAO X Y, LIU W S, XIAO D H, MA Y Z, HUANG L P, TANG Y. A critical review: Crystal structure, evolution and interaction mechanism with dislocations of nano precipitates in Al-Li alloys[J]. Materials & Design, 2022, 217: 110629.

[11] CHEN X X, MA X W, XI H K, ZHAO G Q, WANG Y X, XU X. Effects of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of extruded 2196 Al-Cu-Li alloy[J]. Materials & Design, 2020, 192: 108746.

[12] QI Y, ZHANG H, NIE X J, HU Z H, ZHU H H, ZENG X Y. A high

中国知网 https://www.cnki.net

strength Al-Li alloy produced by laser powder bed fusion: Densification, microstructure, and mechanical properties[J]. Additive Manufacturing, 2020, 35: 101346.

[13] LI H G, HU Y B, LING J, LIU C, TAO G, SUN Z G, TAO J. Effect of double aging on the toughness and precipitation behavior of a novel aluminum-lithium alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24: 3912-3918.

[14] 范云强,陈志国,郑子樵,李艳芬.分级时效对 Al-Cu-Li-Mg-Mn-Zr 合金微观组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(4): 590-595.
FAN Y Q, CHENG Z G, ZHENG Z Q, LI Y F. Effects of multi-stage ageing treatments on microstructure and mechanical properties of Al-Cu-Li-Mg-Mn-Zr alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(4): 590-595.

[15] 梁文杰,潘清林,何运斌. 双级时效对含 Sc 的 Al-Cu-Li-Zr 合金组织与性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011, 42(8): 2260-2265.
LIANG W J, PAN Q L, HE Y B. Effect of double-stage aging treatment on microstructure and mechanical properties of Al-Cu-Li-Zr alloy containing Sc[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(8): 2260-2265.

[16] LI H Y, HUANG D S, KANG W, LIU J J, LIU Y X, OU Y X, LI D W. Effect of different aging processes on the microstructure and mechanical properties of a novel Al-Cu-Li alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(10): 1049-1053.

[17] FIOCCHI J, TUISSI A, BIFFI C A. Heat treatment of aluminium alloys produced by laser powder bed fusion: A review[J]. Materials & Design, 2021, 204: 109651.

[18] QI Y, ZHANG H, ZHANG W Q, HU Z H, ZHU H H. Heat treatment of Al-Cu-Li-Sc-Zr alloy produced by laser powder bed fusion [J]. Materials Characterization, 2022, 195: 112505.

[19] WANG S C, STARINK M J. Precipitates and intermetallic phases in precipitation hardening Al-Cu-Mg-(Li) based alloys[J]. International Materials Reviews, 2005, 50(4): 193-215.

[20] KONNO T J, HIRAGA K, KAWASAKI M. Guinier-Preston (GP) zone revisited: Atomic level observation by HAADF-TEM technique[J]. Scripta Materialia, 2001, 44 (8-9): 2303-2307.

[21] NEIBECKER P, LEITNER M, KUSHAIM M, BOLL T, ANJUM D, AL-KASSAB T, HAIDER F. $L1_2$ ordering and δ′ precipitation in Al-Cu-Li[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 3254.

[22] DORIN T, DE GEUSER F, LEFEBVRE W, SIGLI C, DESCHAMPS A. Strengthening mechanisms of T_1 precipitates and their influence on the plasticity of an Al-Cu-Li alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 605: 119-126.

[23] ZHANG H, ZHONG T, QIAN B Y, TURAKHODJAEV N, LIANG F, SUN D P, WU R Z, MA X C, DU C L, SHEN S, YANG X H, MA Z K, HOU L G, BETSOFEN S . Effect of aging treatment on precipitation strengthening phase and mechanical properties of Al-Cu-Li alloy[J]. Advanced Engineering Materials, 2023, 25(22): 2301079.

[24] WU G H, SHI C C, ZHANG L, LIU W C, CHEN A T, DING W J. Effect of different ageing processes on microstructure and mechanical properties of cast Al-3Li-2Cu-0.2Zr alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2020, 33: 1243-1251.

中国知网 https://www.cnki.net