

加热与热处理

## 时效和预变形对 2195 铝锂合金组织与性能的影响

张义俊<sup>1</sup>, 姚国林<sup>1</sup>, 郭晓光<sup>2</sup>, 卢志安<sup>2</sup>

(1. 河南农业职业学院 机电工程学院, 河南 郑州 451450; 2. 郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 利用透射电镜、拉伸试验等手段, 研究了时效温度、时效时间和预变形量对 2195 铝锂合金显微组织和力学性能的影响, 优化了铝锂合金的时效处理工艺。结果表明: T6 态和 T8 态铝锂合金的硬度均会随着时效时间的延长先增加后减小, 经过预变形处理后铝锂合金的峰值硬度对应的时效时间缩短; 随着时效时间的延长, T6 态和 T8 态铝锂合金的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率的变化趋势相同, 经过预变形处理的 T8 态 (预变形量 5%+175 °C/36 h) 铝锂合金的峰值抗拉强度、峰值屈服强度 and 对应断后伸长率较 T6 态 (175 °C/48h) 铝锂合金分别增加了 11.58%、22.97% 和 17.78%。T6 态和 T8 态铝锂合金中均存在颗粒状  $\delta'$  相、针状  $\theta'$  相、类球形  $\delta'/\beta'$  复合相和针状  $T_1$  相, 且后者的  $T_1$  相更加细小、数量更多、分布更加均匀。2195 铝锂合金适宜的时效工艺和预变形量为 175 °C/36 h+5%。

**关键词:** 2195 铝锂合金; 时效处理; 预变形; 显微组织; 力学性能

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.01.030

**中图分类号:** TG146.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 01-0216-07

## Influence of aging and pre-deformation on microstructure and properties for 2195 Al-Li alloy

Zhang Yijun<sup>1</sup>, Yao Guolin<sup>1</sup>, Guo Xiaoguang<sup>2</sup>, Lu Zhian<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Vocational College of Agriculture, Zhengzhou 451450, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The influences of aging temperature, aging time and pre-deformation amount on the microstructure and mechanical properties for 2195 Al-Li alloy were studied by transmission electron microscope observation and tensile test, and the aging treatment process of Al-Li alloy was optimized. The results show that with the increasing of aging time, the hardness of Al-Li alloys in T6 and T8 states first increases and then decreases, and the aging time corresponding to the peak hardness of Al-Li alloy is shortened after pre-deformation treatment. With the increasing of aging time, the change trends of tensile strength, yield strength and elongation after fracture of Al-Li alloys in T6 and T8 states are the same, and the peak tensile strength, peak yield strength and corresponding elongation after fracture of Al-Li alloy in T8 state after pre-deformation (pre-deformation amount of 5%+175 °C/36 h) are increased by 11.58%, 22.97% and 17.78% respectively compared with Al-Li alloy in T6 states (175 °C/48 h). Particle  $\delta'$  phase, acicular  $\theta'$  phase, quasi spherical  $\delta'/\beta'$  composite phase and acicular  $T_1$  phase are exist in Al-Li alloys in both T6 and T8 states, and  $T_1$  phase of the latter is finer, more quantity and more even distribution. The suitable aging process and pre-deformation amount of 2195 Al-Li alloy is 175 °C/36 h +5%.

**Key words:** 2195 Al-Li alloy; aging treatment; pre-deformation; microstructure; mechanical property

铝锂合金由于具有密度低、比强度高、耐腐蚀性能优异等特点, 在现代化军事、航空航天 (飞行器、飞机蒙皮、机身壁板) 等领域有着广泛的应用前景, 尤其是近年来航空航天技术的进步给铝锂合

金带来巨大发展机遇的同时, 对铝锂合金的综合性能也提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。我国在“七五”期间就开展了铝锂合金的研发与应用工作, 先后开发出了一些铝锂合金, 如高强高弹性模量的 2090 铝锂合金、中强可焊性的 1420 铝锂合金、中强抗损伤的 2197 铝锂合金等<sup>[2-4]</sup>, 并在实际工业生产中得到了成功应用。其中, 2195 铝锂合金作为铝锂合金中的典型代表, 由于具有优良的疲劳性能、抗应力腐蚀性能等特点, 在航天航空领域受到了广泛关注<sup>[5]</sup>,

收稿日期: 2022-04-21; 修订日期: 2022-07-28

基金项目: 河南省科技攻关项目 (192102310244); 机械工程智能化科研创新团队项目 (HNACKT-2020-04)

作者简介: 张义俊 (1974-), 女, 博士, 副教授

E-mail: yijun7402@sina.com

目前的研究多集中在 2195 铝锂合金的微合金化调控、热变形工艺及固溶处理工艺优化等方面<sup>[6-10]</sup>，但是对 2195 铝锂合金厚板时效处理工艺优化方面的报道较少，T6 时效以及经过预变形处理的 T8 时效对 2195 铝锂合金的组织与性能的影响规律尚不清楚。本文拟对比分析 T6 和 T8 时效处理工艺参数对 2195 铝锂合金的硬度、拉伸性能和微观组织的影响，以为后续铝锂合金厚板热处理工艺优化和最终性能提升提供技术参考。

1 试验材料与方法

试验材料为电磁半连续铸造 2195 铝锂合金，采用电感耦合等离子发射光谱法测得主要元素的化学成分，如表 1 所示。

表 1 试验用 2195 铝锂合金的化学成分（%，质量分数）

Table 1 Chemical compositions of experimental 2195 Al-Li alloy（%，mass fraction）

Li	Cu	Mn	Mg	Zr	Ag	Fe	Al
0.89	3.92	0.18	0.49	0.12	0.28	0.05	余量

2195 铝锂合金铸锭经过 450 ℃/18 h+515 ℃/15 h 双级均匀化退火后，在二辊不可逆轧机上进行轧制，均匀化后将铸锭切头、铣面（厚度为 40 mm、宽度为 100 mm、长度为 250 mm），开轧温度为 430 ℃，经过 4 道次（道次变形量分别为 20.0%、31.3%、31.8%和 26.7%）轧制变形处理得到厚度为 11 mm 的热轧板材，轧制过程中确保每道次轧制后交叉 90°进行轧制<sup>[11]</sup>。轧制后分别对热轧板进行固溶和时效处理，固溶工艺为 490 ℃/1.5 h，水淬至室温后进行 T6 和 T8 时效处理，其中：T6 时效处理温度分别为 160、175 和 190 ℃，时效时间为 0~108 h；T8 时效处理中的预变形量分别为 3%、5%和 7%，时效温度为 175 ℃，时效时间为 0~96 h，预变形是淬火后试样在 100 t 预拉伸机上进行的冷变形，变形量控制在 7%以内以保证试样不发生开裂等现象。

维氏硬度试样经过打磨和抛光处理后，在威尔逊 402MVD 型显微维氏硬度计上进行测试，载荷为 100 g，保持载荷时间为 15 s，得到的结果为 5 个点的平均值。根据 GB/T 228.1—2021<sup>[12]</sup>对 2195 铝锂合金试样进行室温拉伸性能测试，拉伸试样尺寸如图 1 所示，取样方向为轧向，拉伸速率为 2 mm·min<sup>-1</sup>，结果为 3 根平行试样的平均值。对不同时效制度下的 2195 铝锂合金采用线切割方法加工为厚度约为

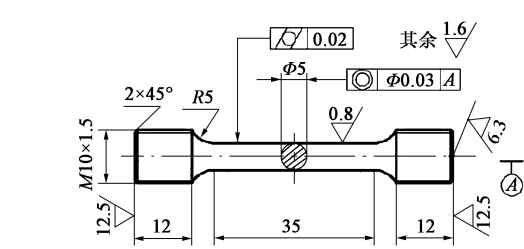


图 1 拉伸试样尺寸  
Fig. 1 Sizes of tensile sample

1 mm 的薄片后，机械研磨至 60 μm，然后冲压为直径为 Φ3 mm 的圆片，电解双喷减薄后（体积分数为 1：3 的硝酸：甲醇溶液，温度为 -40 ℃），在 TEOL 2100 型透射电子显微镜上观察微观组织。

2 试验结果与分析

2.1 经过 T6 时效后材料的力学性能

图 2 为 T6 时效处理对铝锂合金硬度的影响，固溶工艺为 490 ℃/1.5 h。随着时效时间的延长，铝锂合金的硬度先增加后减小，时效温度为 160、175 和 190 ℃ 时，铝锂合金的峰值硬度/峰值时效时间分别为 134 HV/72 h、143 HV/54 h 和 144 HV/36 h。可见，时效温度的升高有助于减小峰值硬度出现的时间，这主要是因为时效温度越高，铝锂合金内部原子的扩散速度越快<sup>[13]</sup>，到达峰值硬度的时间越短。

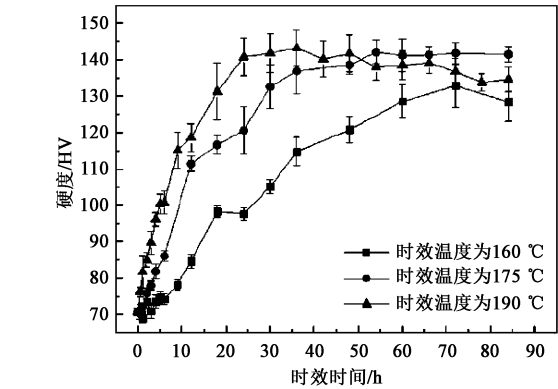


图 2 T6 时效处理对铝锂合金硬度的影响  
Fig. 2 Influence of T6 aging treatment on hardness of Al-Li alloy

图 3 为 T6 时效处理对铝锂合金拉伸性能的影响，固溶工艺为 490 ℃/1.5 h。当时效温度为 160 ℃ 时，随着时效时间的延长，铝锂合金的抗拉强度  $R_m$  和屈服强度  $R_{eL}$  先增大后趋于稳定或略有减小，断后伸长率  $A$  呈现逐渐减小的趋势，时效时间为 96 h 时的峰值抗拉强度和峰值屈服强度分别为 442 和 363 MPa、对应断后伸长率为 9.7%。这主要是因为合金中起强化作用的析出相会随着时效时间

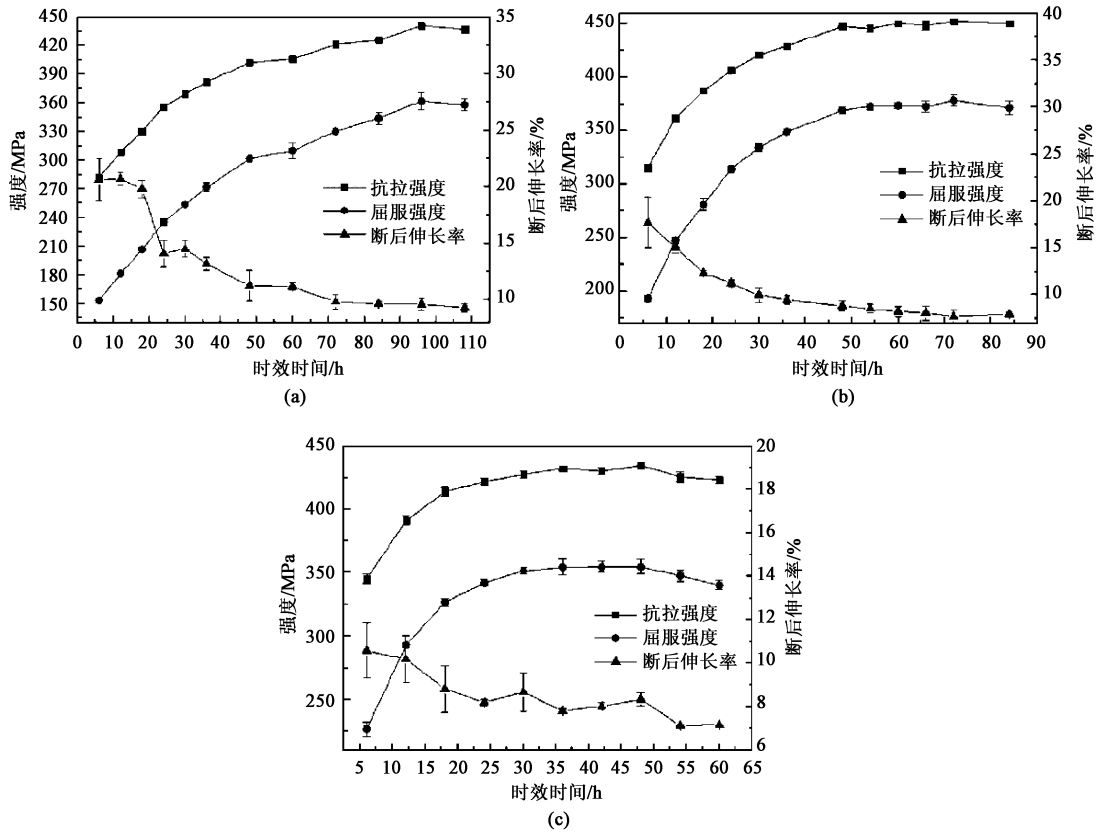


图 3 T6 时效处理对铝锂合金拉伸性能的影响

(a) 时效温度为 160 °C (b) 时效温度为 175 °C (c) 时效温度为 190 °C

Fig. 3 Influences of T6 aging treatment on tensile property of Al-Li alloy

(a) Aging temperature of 160 °C (b) Aging temperature of 175 °C (c) Aging temperature of 190 °C

的延长而增多, 效果逐渐增强, 但是, 当时效时间延长至一定程度时析出相会发生粗化与长大, 造成强化效果减弱, 强度减小。当时效温度为 175 和 190 °C 时, 铝锂合金的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率的变化趋势与时效温度为 160 °C 时的相同, 即抗拉强度和屈服强度随着时效时间的延长先增大后减小, 断后伸长率逐渐减小, 峰值强度出现的时间分别为 48 和 36 h, 相应地, 抗拉强度分别为 449 和 433 MPa, 屈服强度分别为 370 和 355 MPa, 断后伸长率分别为 9.0% 和 7.9%。可见, 随着时效温度从 160 °C 上升至 190 °C, 铝锂合金的峰值抗拉强度和峰值屈服强度的变化不大, 断后伸长率从 9.7% 减小至 7.9%。综合而言, 时效温度为 175 °C、时效时间为 48 h 时, 铝锂合金具有较好的强塑性。

## 2.2 经过 T8 时效后材料的力学性能

图 4 为不同预变形量下铝锂合金的硬度随时效时间的变化曲线, 时效温度为 175 °C。随着时效时间的延长, 不同预变形量下铝锂合金的硬度先增加后减小, 预变形量为 3%、5% 和 7% 时对应的峰值硬度/

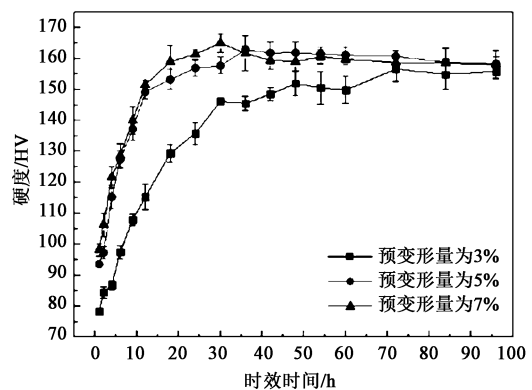


图 4 不同预变形量下铝锂合金的硬度随时效时间的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of hardness for Al-Li alloy with aging time under different pre-deformation amounts

峰值时效时间分别为 158 HV/72 h、164 HV/36 h 和 166 HV/30 h。可见, 铝锂合金的峰值硬度会随着预变形量的增加而增大, 这主要是因为增加预变形量, 铝锂合金中的位错密度增大, 加工硬化现象更加显著<sup>[14]</sup>, 相应的峰值硬度越大。

图 5 为不同预变形量下铝锂合金的拉伸性能,

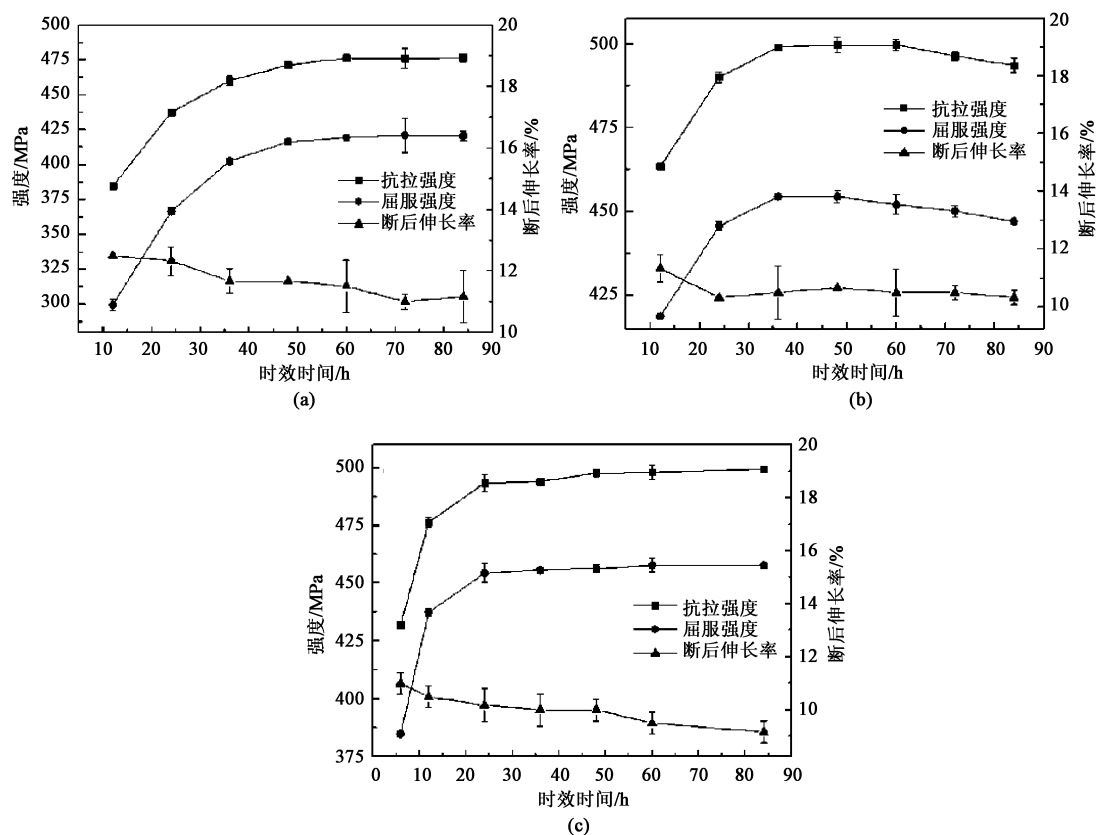


图 5 不同预变形量下铝锂合金的拉伸性能

(a) 3% (b) 5% (c) 7%

Fig. 5 Tensile properties of Al-Li alloy under different pre-deformation amounts

时效温度为 175 ℃。随着时效时间的延长, 预变形量为 3%、5% 和 7% 时的铝锂合金的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率的变化趋势与 T6 态铝锂合金相同, 即抗拉强度和屈服强度随着时效时间的延长先增大后趋于稳定, 断后伸长率逐渐减小, 峰值强度出现的时间分别为 60、36 和 24 h, 相应地, 峰值抗拉强度分别为 477、501 和 500 MPa, 峰值屈服强度分别为 420、455、456 MPa, 对应断后伸长率分别为 11.6%、10.6% 和 10.2%。可见, 随着预变形量从 3% 增加至 5%, 铝锂合金的抗拉强度和屈服强度明显长大, 断后伸长率减小; 当预变形量从 5% 增加至 7% 时, 铝锂合金的抗拉强度和屈服强度基本不变, 而断后伸长率继续减小。因此, 选择预变形量为 5%、时效温度为 175 ℃、时效时间为 36 h 为适宜的 T8 时效工艺制度。

### 2.3 分析与讨论

图 6 为 175 ℃/48 h 峰值时效态铝锂合金的透射电镜显微形貌。可见, 175 ℃/48 h 峰值时效态铝锂合金中存在颗粒状  $\delta'$  相、针状  $\theta'$  相、类球形  $\delta'/\beta'$  复合相 (以  $\beta'$  相为形核点、外层为  $\delta'$  相) 和针状

$T_1$  相。其中,  $\beta'$  相在铝锂合金均匀化热处理过程中产生, 在时效热处理阶段容易被析出的同为  $Li_2$  结构的  $\delta'$  相所包裹, 而形成  $\delta'/\beta'$  复合相<sup>[15]</sup>。针状  $\theta'$  相 (晶格常数  $a=0.404$  nm、 $c=0.580$  nm<sup>[16]</sup>) 含量较少, 与基体位向关系为  $(100)_{\theta'}/(100)_{Al}$ 、 $[001]_{\theta'}/[001]_{Al}$ , 可以起到析出强化的作用。具有六方晶体结构的  $T_1$  相与  $\alpha-Al$  基体存在如下位向关系:  $\langle 1010 \rangle_{T_1} // \langle 101 \rangle_{Al}$ ,  $\langle 0001 \rangle_{T_1} // \{111\}_{Al}$ ,  $T_1$  相在合金中数量较多且呈均匀分布, 如果继续延长时效时间或者升高时效温度, 合金中起主要强化作用的  $T_1$  相容易发生粗化和长大, 从而降低合金的拉伸性能。

图 7 为预变形量为 5%+175 ℃/36 h 时的峰值时效态铝锂合金的透射电镜显微形貌。选区电子衍射花样和微观形貌表明, 预变形量为 5% 时的峰值时效态铝锂合金中的主要析出相为颗粒状  $\delta'$  相、针状  $\theta'$  相、 $\delta'/\beta'$  复合相和针状  $T_1$  相。相较于 175 ℃/48 h 峰值时效态铝锂合金 (图 6), 经过预变形处理的 T8 态合金中的  $T_1$  相相对更加细小、数量更多、分布更加均匀。这主要是因为预变形处理有助于增加铝锂合金中位错等晶体缺陷的密度,



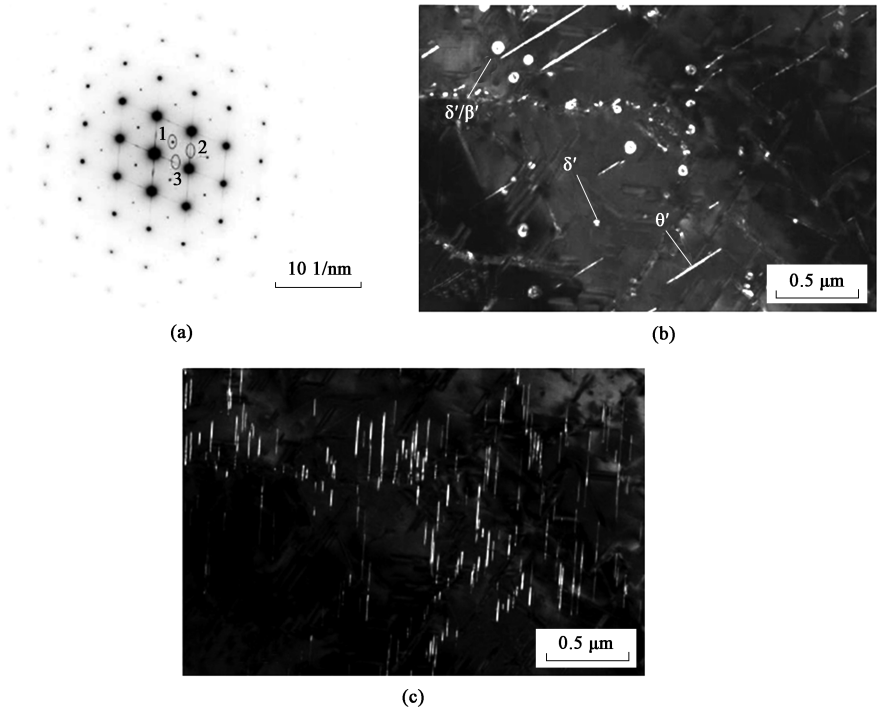


图 6 175 °C/48 h 峰值时效态铝锂合金的 TEM 形貌

(a) 选区电子衍射花样 (b)  $\delta'$ 、 $\theta'$ 和 $\delta'/\beta'$ 相 (c)  $T_1$  相

Fig. 6 TEM morphologies of Al-Li alloy in peak aged state at 175 °C/48 h

(a) Selected area electron diffraction pattern (b)  $\delta'$ ,  $\theta'$  and  $\delta'/\beta'$  phases (c)  $T_1$  phase

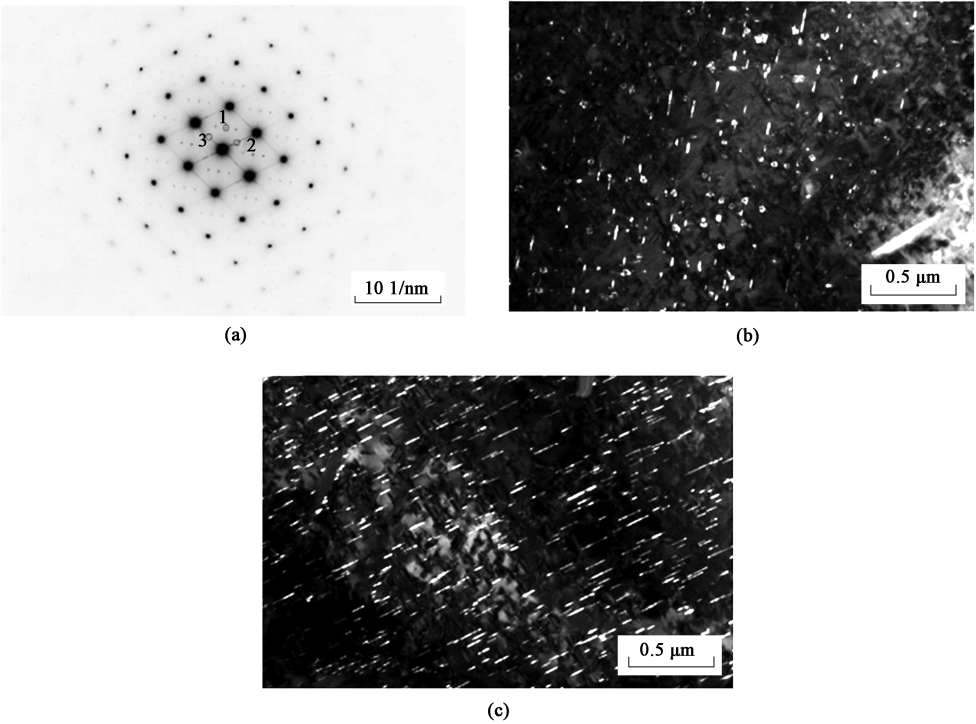


图 7 预变形量 5%+175°C/36 h 时的峰值时效态铝锂合金的 TEM 形貌

(a) 选区电子衍射花样 (b) 析出相 (c)  $T_1$  相

Fig. 7 TEM morphologies of Al-Li alloy in peak aged state with pre-deformation amount of 5% and 175 °C/36 h

(a) Selected area electron diffraction pattern (b) Precipitate (c)  $T_1$  phase

从而为  $T_1$  相的非均质形核提供更多的形核点<sup>[17]</sup>, 时效过程中与基体保持半共格/共格取向关系的  $T_1$  相的数量会增多, 有助于提升铝锂合金的硬度和强度。此外,  $T_1$  相的析出还会在一定程度上消耗  $\delta'$  相和  $\theta'$  相析出所需要的 Cu 和 Li 原子<sup>[18]</sup>, 因此,  $\delta'$  相和  $\theta'$  相的含量会相对 175 °C/48 h 峰值时效态铝锂合金中更少。

对比 175 °C/48 h 峰值时效态 (T6 态) 和预变形量 5%+175 °C/36 h 峰值时效态 (T8 态) 铝锂合金的力学性能可知, 前者的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为 449 MPa、370 MPa 和 9.0%, 后者的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为 501 MPa、455 MPa 和 10.6%, 经过预变形处理的 T8 态铝锂合金的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率较 T6 态分别增加了 11.58%、22.97% 和 17.78%。究其原因, 这主要与经过预变形处理的 T8 态铝锂合金中起主要强化作用的  $T_1$  相的数量增多、尺寸变小、分布更加均匀有关<sup>[19]</sup>, 虽然时效过程中  $T_1$  相的形成会减少  $\delta'$  相和  $\theta'$  相含量, 但是后两相的强化效果相对较弱<sup>[20]</sup>, 对强度影响有限; 此外, 如果将预变形量从 5% 增加至 7%, 铝锂合金的位错密度增大, 加工硬化效果更加显著, 在峰值时效态强度差异不大的前提下, 塑性会有所降低。整体而言, 预变形量 5%+175 °C/36 h 峰值时效态 (T8 态) 铝锂合金具有良好的强塑性结合。

### 3 结论

(1) 随着时效时间的延长, T6 态和 T8 态铝锂合金的显微硬度均表现为先增加后减小; 时效温度为 160、175 和 190 °C 时, 铝锂合金的峰值硬度/峰值时效时间分别为 134 HV/72 h、143 HV/54 h 和 144 HV/36 h, 预变形量为 3%、5% 和 7% 时, 铝锂合金的峰值硬度/峰值时效时间分别为 158 HV/72 h、164 HV/36 h 和 166 HV/30 h。

(2) 随着时效时间的延长, 预变形量为 3%、5% 和 7% 的铝锂合金的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率的变化趋势与 T6 态铝锂合金相同, 即抗拉强度和屈服强度随着时效时间的延长先增大后减小, 断后伸长率逐渐减小。经过预变形处理的 T8 态 (预变形量 5%+175 °C/36 h) 铝锂合金的峰值抗拉强度、峰值屈服强度 and 对应断后伸长率较 T6 态 (175 °C/48 h) 铝锂合金分别增加了 11.58%、22.97% 和 17.78%。

(3) 175 °C/48 h 峰值时效态和预变形量 5%+175 °C/36 h 峰值时效态铝锂合金中均存在颗粒状  $\delta'$  相、针状  $\theta'$  相、类球形  $\delta'/\beta'$  复合相和针状  $T_1$  相, 但是后者的  $T_1$  相更加细小、数量更多、分布更加均匀, 而  $\delta'$  相和  $\theta'$  相的含量会相对减少。

#### 参考文献:

- [1] 冯朝辉, 于娟, 郝敏, 等. 铝锂合金研究进展及发展趋势 [J]. 航空材料学报, 2020, 40 (1): 1-11.  
Feng C H, Yu J, Hao M, et al. Research progress and development trend of Al Li alloys [J]. Journal of aeronautical materials, 2020, 40 (1): 1-11.
- [2] 李建军, 徐佳辉, 黄亮, 等. 铝锂合金形变热处理工艺研究进展 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 1-10.  
Li J J, Xu J H, Huang L, et al. Research progress of thermomechanical treatment process of Al Li alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 1-10.
- [3] 李旭, 杨庆波, 樊祥泽, 等. 变形参数对 2195 Al-Li 合金动态再结晶的影响 [J]. 金属学报, 2019, 55 (6): 709-719.  
Li X, Yang Q B, Fan X Z, et al. Effect of deformation parameters on dynamic recrystallization of 2195 Al-Li alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55 (6): 709-719.
- [4] 章润喆, 马云龙, 刘丹阳, 等. 2195 铝锂合金力学性能和组织与冷热变形过程的相关性 [J]. 稀有金属, 2021, 45 (2): 129-136.  
Zhang R Z, Ma Y L, Liu D Y, et al. Dependence of mechanical properties and microstructures of 2195 Al-Li alloy on cold and hot deformation [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45 (2): 129-136.
- [5] 郑晖, 栾景旺, 孙凌崴, 等. 固溶温度对 2195 铝锂合金板料成形性能的影响 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (1): 46-53.  
Zheng H, Luan J W, Sun L W, et al. Effect of solution temperature on formability of 2195 Al Li alloy sheet [J]. Journal of Plastic Engineering, 2022, 29 (1): 46-53.
- [6] Xu X, Zhao G, Yu S, et al. Effects of extrusion parameters and post-heat treatments on microstructures and mechanical properties of extrusion weld seams in 2195 Al-Li alloy profiles [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9 (3): 2662-2678.
- [7] 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): 1193-1196.  
Xiao D H, Wang X K, Chen W B, et al. Effect of solution temperature on microstructure and properties of 2195 Al Li alloy [J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2021, 41 (10): 1193-1196.
- [8] Yang S L, Jian S, Li X W, et al. Mechanical behavior and microstructure evolution of Al-Cu-Li alloy during multi-pass hot deformation [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46 (10): 2825-2830.

(下转第 244 页)