

# 道次压下量对 2197 铝锂合金轧制组织与力学性能的影响

冀宏亮<sup>1</sup>, 边丽萍<sup>1,2,3</sup>, 郑毅<sup>1</sup>, 刘先文<sup>1</sup>, 梁伟<sup>1,2</sup>

(1. 太原理工大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

(2. 先进镁基材料山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

(3. 先进金属复合材料成形技术与装备教育部工程研究中心, 山西 太原 030024)

**摘要:** 针对铝锂合金塑韧性、成形性差的问题, 本工作通过 OM/SEM 微观组织分析、拉伸及硬度/电导率测试, 研究了在总压下量 75% 条件下、轧制道次压下量 (即 10%、30%、30%+60%, 分别对应小、中、大道次压下量) 对 2197 铝锂合金组织与力学性能的影响。结果表明: 道次压下量显著影响铝锂合金的晶粒结构、析出相的数量及分布。轧制态合金的强度随单道次轧制压下量的增加而显著增加、而塑韧性则明显下降。T8 时效处理使析出相大量析出, 轧制合金中的 Portevin-Le Chatelier (PLC) 效应得到消除, 小、大道次压下量轧制合金的力学性能得到显著提升。大压下量轧制合金经时效处理后强塑性综合力学性能最高, 抗拉强度为 384.94 MPa、断后伸长率为 12.45%, 较小、中道次压下量轧制时效合金分别提高 2%、21% 和 29%、31%。

**关键词:** 铝锂合金; 轧制; 晶粒细化; 析出相; 力学性能

**中图分类号:** TG146.21

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2023)04-1476-07

铝锂合金具有低密度、高比强度和比刚度等特性, 是航空航天工业实现结构轻量化的关键材料<sup>[1-4]</sup>。铝合金中加入锂在降低密度、显著提高刚度的同时也带来了 Al<sub>3</sub>Li 析出相引起的平面滑移, 加剧了铝基体晶粒结构引起的组织性能各向异性问题, 导致铝锂合金强度低、塑韧性及成形性能差<sup>[5]</sup>, 对于用量最多的铝锂合金板材尤为显著。因此, 细化晶粒、控制析出相是提高铝锂合金成形性和力学性能的关键。铝锂合金中析出相的析出行为 (类型、大小、分布、数量等), 尤其主要强化相 T<sub>1</sub> 相, 强烈受塑性变形 (主要是位错) 的影响<sup>[6-8]</sup>。同时, 析出相也强烈影响变形过程中铝锂合金基体的组织演化过程 (如位错累积、回复和再结晶进程)<sup>[9]</sup>。因此, 对于铝锂合金轧制板材, 轧制道次压下量将对铝锂合金基体组织和析出相产生至关重要的影响, 最终决定了铝锂合金的成形性和力学性能。目前, 铝锂合金的加工成形工艺颇为复杂, 对于板材轧制一般采用小压下量多道次轧制以免开裂<sup>[5]</sup>; 同时在合金元素作用、变形后固溶+变形+时效的最终形变热处理方面研究较多<sup>[10-13]</sup>, 而关于轧制道次压下量对铝锂合金组织演变及力学性能的影响缺乏系统探究。本工作以第 3 代 2197 铝锂合金 (主要析出强化

相为  $\delta'$ 、 $\theta'$  和 T<sub>1</sub> 等<sup>[14-15]</sup>) 为研究对象, 考察小、中、大不同道次压下量对轧制及轧后时效合金基体晶粒、析出相等微观组织及力学性能的影响规律。

## 1 实验

利用 XG-2 电阻炉熔炼制备 2197 铝锂合金, 采用普通重力铸造方法在氩气保护下浇铸成锭。合金的化学成分见表 1。

利用电火花线切割将铸锭切割成尺寸为 50 mm × 20 mm × 4 mm 的板材, 后经 540 °C/1.5 h 均匀化处理、水淬。均匀化水淬处理后的板材在真空管式炉中在 450 °C 保温 10 min 后, 分别按照不同单道次压下量 (小、中、大) 进行若干道次轧制到 1 mm 厚, 总压下量为 75%。相邻两道次轧制前在 450 °C 退火 10 min。具体轧制工艺为: (1) LRR (light reduction rolling):

表 1 2197 铝锂合金化学成分

Table 1 Measured chemical composition of the 2197 Al-Li alloy (wt%)

Cu	Li	Mg	Mn	Zr	Al
2.8	1.5	0.25	0.32	0.12	Bal.

收稿日期: 2022-03-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52175355); 国家重点研发计划 (2018YFA0707304); 山西省重点研发计划 (201903D121087)

作者简介: 冀宏亮, 男, 1995 年生, 硕士生, 太原理工大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030024, 电话: 0351-6018398, E-mail: 961824807@qq.com

单道次 10%小压下量轧制,总道次数为 11;(2) MRR (middle reduction rolling):单道次 30%中等压下量轧制,总道次数为 4;(3) HRR (heavy reduction rolling):单道次 (30%+60%) 大压下量轧制,总道次数为 2(见表 2)。轧制后的板材经 530 °C/10 min 固溶处理、6% 冷轧预变形后进行 170 °C/30 h 时效处理 (T8)。

采用 HV-1000 显微维氏硬度计进行硬度测试、Sigma 2008 B Eddy 涡流电导率仪测定电导率、INSTRON 5900 电子万能材料试验机进行拉伸性能测试。采用 Leica DM2500 金相显微镜、JEM-200F 透射电子显微镜、TSCAN Mira3 LMH 扫描电子显微镜配带的能谱仪 (EDS) 进行组织、成分分析和断口观察。

## 2 结果

### 2.1 显微组织

图 1 为轧制合金的金相显微组织。随单道次轧制压下量、轧制道次间中间退火次数的不同,位错数量、组态不同,回复程度也不同,同时轧制过程中析出了大量析出相,导致合金的晶粒形态、胞状晶粒厚度、析出相数量、分布均不同。如图 1 所示,固溶合金经轧制后,晶粒沿轧制方向被拉长形成胞状组织(如箭头所示)。如图 1a, 1d 所示, LRR 轧制合金晶粒略显拉长、较为粗大,大量析出相析出、分布较为均匀。MRR 轧制合金(图 1b, 1e)则回复显著、晶粒明显拉

长,析出相较少、多沿晶界分布。HRR 轧制合金(图 1c, 1f)晶粒急剧细化为拉长的纤维状胞状组织、同时在高应变条件下 S 形剪切带形成并与胞带交割;伴随有高密度析出相析出、分布更为均匀。

图 2 为 T8 时效态合金的金相组织。相比时效前, T8 时效后合金中的析出相数量显著增加、分布更加均匀,但 MRR、HRR 中析出相呈明显条带分布特征, LRR 时效合金中的析出相分布最为均匀,而 HRR 时效试样析出相数量更多、但分布多集中于密集纤维状胞晶晶界中。图 3 为 HRR 时效合金的 TEM 像及选区电子衍射 (SAED) 花样。

图 3a, 3b TEM 像及插图 SAED 分析表明,合金中大量存在的高密度长度约为 100 nm 的针状相为 T1 相(箭头所示)<sup>[11,16]</sup>,少量粗化或细小的球形颗粒为 δ' 相。图 4 为 HRR 时效合金的 SEM 组织及 EDS 分析结果。可知,除 Cu 元素偏析明显外,其它元素分布均匀。图 4b 中 1、2 点对应 EDS 分析结果表明, Al、Cu 原子比接近 2:1,表明这些大颗粒为均匀化处理阶段残余的非平衡共晶组织,其主要成分为 Al<sub>2</sub>Cu。

### 2.2 力学性能

图 5 为轧制态和 T8 时效态合金的拉伸工程应力-工程应变曲线。图 5a 表明,轧制态合金的抗拉强度随道次压下量的增加而显著增加、断后伸长率则相反。LRR 试样屈服强度、抗拉强度、断后伸长率分别为: 159.16 MPa、275.80 MPa、13.25%; MRR 试样屈服强度、抗拉强度、断后伸长率分别为: 146.06 MPa、300.54 MPa、9.61%; HRR 试样屈服强度、抗拉强度、断后伸长率分别为: 131.44 MPa、310.98 MPa、5.52%。图 5b 表明, T8 时效合金 LRR、HRR 试样强度得到大幅度提高、强度增幅约 100 MPa,而 MRR 试样强度仅小幅增加。经 T8 时效后, LRR 试样屈服强度、抗拉强

表 2 轧制工艺

Table 2 Rolling process

Rolling process	Per-pass reduction/%	Total rolling passes	Total reduction/%
LRR	10	11	75
MRR	30	4	75
HRR	30 (1-pass) 60 (2-pass)	2	75

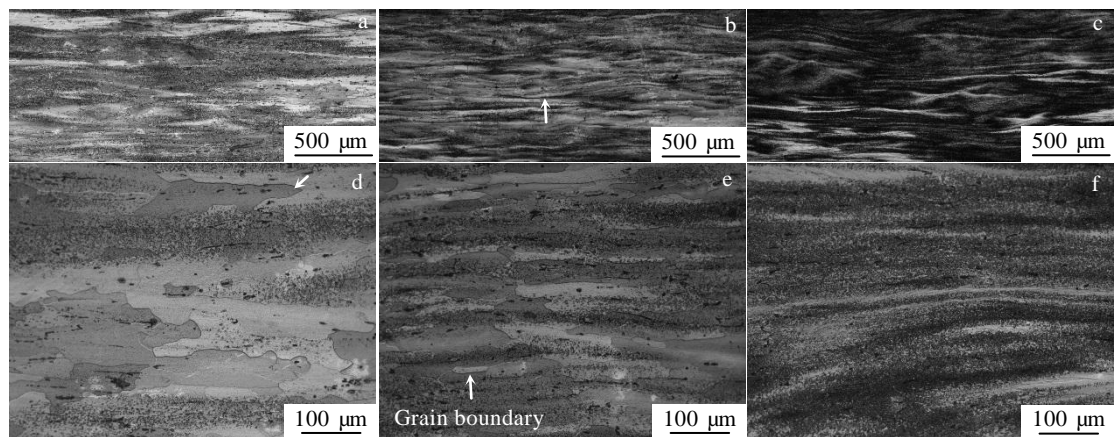


图 1 轧制态合金的金相显微组织

Fig.1 Optical microstructures of as-rolled alloys after different rolling processes: (a, d) LRR, (b, e) MRR, and (c, f) HRR

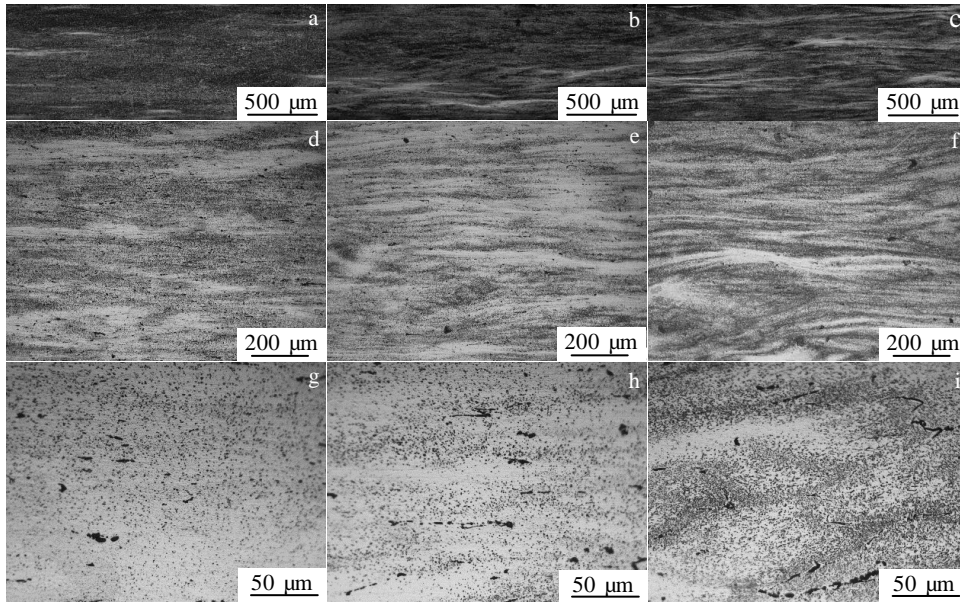


图 2 不同轧制工艺下时效合金的金相显微组织

Fig.2 Optical microstructures of T8 alloys after different rolling processes: (a, d, g) LRR, (b, e, h) MRR, and (c, f, i) HRR

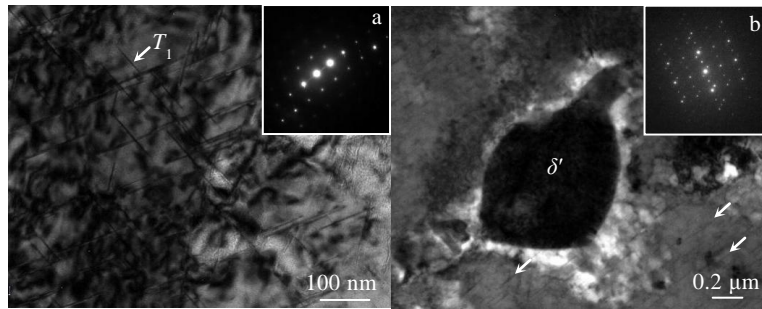


图 3 HRR 时效合金的 TEM 像及 SAED 花样

Fig.3 TEM images and SAED patterns of the aged HRR alloy: (a)  $T_1$  phase taken along  $[112]_{Al}$  and (b)  $\delta'$  taken along  $[100]_{Al}$

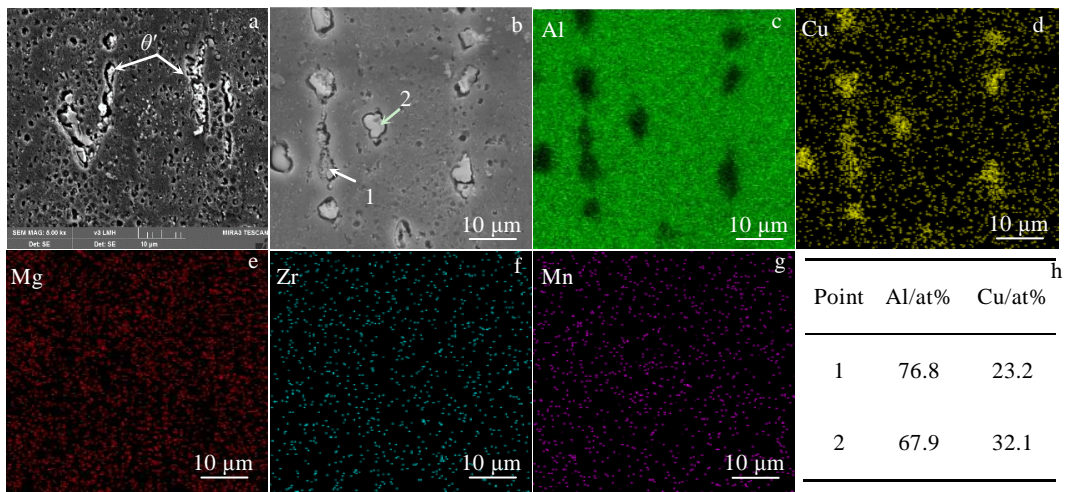


图 4 HRR 时效合金的 SEM 组织和 EDS 分析结果

Fig.4 SEM microstructures (a, b) and EDS element mappings (c-g) of the aged HRR alloy; EDS analysis results of points 1 and 2 marked in Fig.4b (h)



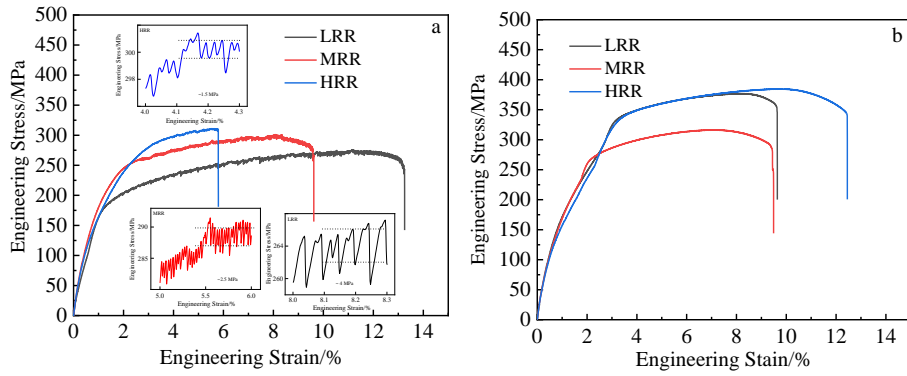


图5 合金轧制态及 T8 时效的工程应力-工程应变曲线

Fig.5 Engineering stress-engineering strain curves of the as-rolled (a) and T8 aged (b) alloys

度、断后伸长率分别为: 148.76 MPa、376.02 MPa、9.63%; MRR 试样屈服强度、抗拉强度、断后伸长率分别为: 138.21 MPa、316.67 MPa、9.48%; HRR 试样屈服强度、抗拉强度、断后伸长率分别为: 135.70 MPa、384.94 MPa、12.45%。相较 T8 时效合金 LRR 和 MRR 试样, HRR 试样抗拉强度、断后伸长率分别提高 2%、21%和 29%、31%。大压下量少道次轧制及 T8 时效合金的强塑性最佳。此外, 3 种轧制试样的拉伸性能曲线均出现锯齿形流变特征、即 Portevin-Le Chatelier phenomenon (PLC) 现象<sup>[17]</sup>, 且 PLC 效应的波动幅度随道次压下量的增加由 LRR 的约 4 MPa 逐步减弱到 MRR 的约 2.5 MPa、HRR 的约 1.5 MPa。经 T8 时效处理后, 3 种合金中的 PLC 效应均消失。

图 6 为合金轧制态(6a~6c) 及 T8 时效态 (6d~6f) 的拉伸断口形貌。图 6a~6c 表明, 轧制态合金断口表面均有大量细小韧窝、断裂模式为韧性断裂。图 6a 表明, LRR 合金中韧窝大而深、分布更为均匀, 呈现出优良的塑性。图 6b 表明, MRR 合金中存在大、小 2 种韧窝区域, 小韧窝区韧窝更为细密、分布较为集中, 局部可观察到平面滑移特征。这与 MRR 合金中回复显著、析出相主要沿晶界分布特征有关。图 6c 所示的 HRR 合金中韧窝浅而小、平面滑移特征更为显著, 这与单道次大应变轧制铝锂合金中 T<sub>1</sub>、共格 Al<sub>3</sub>Li、半共格 Al<sub>2</sub>Cu 等析出相在晶界、晶内大量析出、分布更为均匀有关。图 6d 表明, LRR 时效合金因大量析出相的均匀析出, 韧窝显著减小、平面滑移特征更为

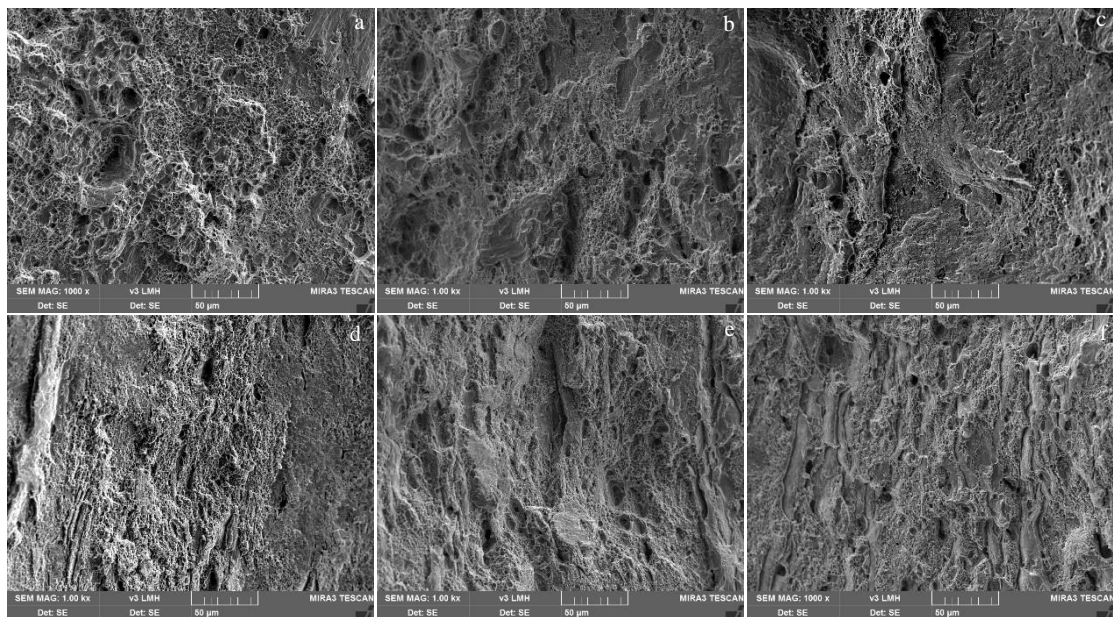


图6 轧制及 T8 时效合金的断口形貌

Fig.6 Fracture morphologies of the as-rolled (a-c) and T8 aged (d-f) alloys: (a, d) LRR, (b, e) MRR, and (c, f) HRR

显著。图 6e 表明, MRR 时效合金韧窝减小、可观察到粗大拉长晶粒形态。而 HRR 时效合金(图 6f)则呈现出大量细小的拉长晶粒和不均匀分布的细密韧窝,表明合金经大道次应变量轧制和 T8 处理后晶粒亚分或再结晶的发生、同时大量析出相析出且多分布于晶界。

### 2.3 硬度及电导率

图 7a 为轧制态及 T8 时效态合金的硬度测试结果。时效前、后硬度变化规律相同、时效后合金的硬度大幅度提高。轧制合金中, MRR 试样硬度值(HV)最低、为 921.59 MPa; HRR 试样硬度最高、为 1035.59 MPa; LRR 试样硬度略高于 MRR 试样、为 942.19 MPa。T8 处理后,合金时效后硬度值(HV)较轧制态总体高出约 392 MPa, MRR、LRR 试样硬度值(HV)依次为 1270.60、1289.97 MPa, HRR 试样硬度最大、达到 1366.85 MPa。图 7b 为轧制态及 T8 时效态合金的电导率。轧制合金随单道次压下量的增加、电导率依次降低。LRR、MRR、HRR 试样的电导率分别为 19.34%IACS、18.87%IACS 和 18.59%IACS。T8 时效处理后 LRR、MRR、HRR 试样电导率分别为 19.13%IACS、19.08%IACS、18.28%IACS。除 MRR 时效合金外,电导率均较时效前合金略有下降。

## 3 讨论

### 3.1 道次压下量对合金组织演变及析出相的影响

在轧制总变形量相同的条件下,道次压下量及中间退火次数显著影响铝锂合金中基体组织演变与析出相的动态析出过程,因而导致不同的组织特征。图 1a, 1d 表明, LRR 轧制合金由于单道次 10%小变形量轧制,对于高层错能的铝合金,位错易于交滑移形成位错胞,析出相在变形过程中同步析出、钉扎位错、抑制回复和再结晶的进行,因而合金的晶

粒细化程度较低、晶粒较为粗大、析出相分布较为均匀。图 1b, 1e 表明, 30%单道次中等压下量、4 道次轧制多次中间退火条件下,位错产生、湮灭、重组速度较快,回复显著,晶粒取向差较大,晶粒显著细化为拉长的胞状晶粒;随之析出相多沿胞状晶晶界、畸变能较大区域不均匀析出。图 1c, 1f 表明, HRR 合金经 30%、60%两道次大压下量轧制,基体中瞬间形成高密度位错、导致大量析出相析出,因而形成更为细密、显著拉长的纤维状胞状晶组织以及沿晶界、剪切带、过渡带等畸变能较大区域密集分布的析出相分布特征。

### 3.2 道次压下量对合金力学性能

晶粒细化和高密度析出相的析出和均匀分布是铝锂合金强度提升的关键。LRR 轧制合金中胞状晶粒粗大,中间退火次数多、析出相颗粒尺寸较大、数量较多、分布较均匀,因此合金的塑性最高、强度最低。MRR 轧制合金在轧制过程中基体回复速率大、对第二相析出不利,因此虽然晶粒显著细化,但析出相数量相对较少、且多沿晶界分布,因而力学性能略有提升。HRR 合金道次应变量最大、晶粒细化程度最高、析出相数量最多、分布相对均匀,因而综合力学性能最高。

轧制态合金拉伸曲线上的锯齿形流变特征(PLC 效应)源于溶质原子和位错的交互作用<sup>[18]</sup>。均匀化处理合金经不同道次压下量轧制后,析出的第二相粒子引起晶格畸变使 Cu、Mg 等溶质原子在析出相周围偏聚,溶质原子对位错的反复钉扎和脱钉,导致 PLC 效应的产生。随着单道次变形量的加大和 T8 时效处理,析出相数量急剧增加、基体中溶质原子数量急剧下降,PLC 效应也逐步减弱或消失。同时,数量密集、分布均匀的析出相可有效阻碍位错运动、提高塑性变形的均匀性和稳定性,也促使 PLC 效应减弱。

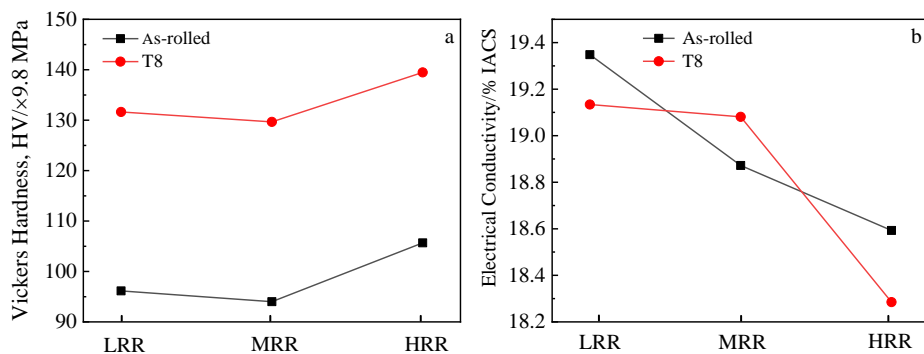


图 7 轧制及 T8 时效合金的硬度及电导率

Fig.7 Vickers hardness (a) and electrical conductivity (b) of the as-rolled and T8 aged alloys

### 3.3 道次压下量对合金导电性能的影响

影响合金电导率的主要因素为晶界和析出相。

#### 3.3.1 晶界

电子与晶界的相互作用会导致电导率的下降。轧制后的板材晶粒呈现拉长状态,存在几乎平行于轴向和垂直于轴向的2种晶界,分别表示为GBP和GBV,由单位密度引起的电阻率变化可以分别表示为 $\Delta\rho_{GB}^p$ 和 $\Delta\rho_{GB}^v$ 。纯铝的电阻率值定性地表示为<sup>[19]</sup>:

$$\rho = \rho_{Al} + \frac{\Delta\rho_{GB}^p}{L} + 2\frac{\Delta\rho_{GB}^v}{t} \quad (1)$$

式中,  $L$  和  $t$  分别为晶界的长度和宽度。相同  $t$  和较大的  $L$  将得到较低的电阻率,相应导电性较好。轧制后的晶粒尺寸越小(宽度越小),单位面积区域内的晶界数量越多且单个晶粒的宽度越小,与电子相互作用的晶界增多,电阻率增加、电导率减小。因此, HRR 轧制合金电导率最小。

#### 3.3.2 析出相

根据 Raeesinia 等<sup>[20]</sup>析出相对合金电阻率的影响公式:

$$\rho = \rho_{\text{pure}}(T) + \sum_i \rho_i C_i + \frac{12}{\lambda^{1/2}} \quad (2)$$

$$\lambda = \left( \frac{200\pi}{f_A} \right)^{1/2} \cdot \frac{d}{2} \quad (3)$$

式中,  $\rho$  为金属的电阻率,  $\rho_{\text{pure}}(T)$  为温度  $T$  时金属的电阻率,  $\sum_i \rho_i C_i$  为第  $i$  种杂质原子对电阻率影响的总和,其中  $\rho_i$  为第  $i$  种杂质原子的电阻率,  $C_i$  为其浓度,  $\lambda$  为析出相间距,  $f_A$  为析出相体积分,  $d$  为析出相的直径,  $\rho_p = 12/\lambda^{1/2}$  为析出相对合金电阻率的影响( $p$ : precipitate)。相间距的减小会阻碍自由电子流动,降低合金的电导率。LRR、HRR 时效合金中均析出大量第二相,故电导率较时效前降低。但 MRR 时效合金较时效前有大量析出相析出、但析出相的数量较 LRR、HRR 合金低且分布不均匀,相间距较大,故电导率略有提高。

## 4 结 论

1) 在轧制总压下量相同的条件下,道次压下量对2197铝锂合金组织与力学性能有显著影响。道次压下量不同,位错累积数量及位错组态不同,析出相析出顺序、数量、分布不同。单道次压下量越大、轧制道次越少,晶粒越细、析出相越多,合金强度越高、塑性越低。

2) 经 T8 时效处理后,单道次(30%+60%)大压下量轧制(HRR)和单道次10%小压下量轧制(LRR)因析出相更多、分布更均匀,强度提升最大,而单道

次30%中等压下量轧制(MRR)强度提升最小。HRR时效合金因基体晶粒尺寸最细、析出相最多而强度、塑性最高。

### 参考文献 References

- [1] Li Hongping(李红萍), Ye Lingying(叶凌英), Deng Yunlai(邓运来) *et al. Materials China*(中国材料进展)[J], 2016, 35(17): 7
- [2] Dursun T, Soutis C. *Materials & Design*[J], 2014, 56: 862
- [3] Wang Yichang(王一唱), Tong Xin(童鑫), You Guoqing(游国强) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(3): 1069
- [4] Kablov E N, Antipov V V, Oglodkova J S *et al. Metallurgist*[J], 2021, 65(1): 72
- [5] Wanhill R, Prasad N E, Gokhale A A *et al. Aluminum-Lithium Alloys: Processing, Properties, and Applications*[M]. Holland: Butterworth-Heinemann, 2013: 205
- [6] Li Jinfeng, Ye Zhihao, Liu Danyang *et al. Acta Metallurgica Sinica*[J], 2017, 30: 133
- [7] Chen Yonglai, Li Jinfeng, Zhang Xuhu. *Materials Science Forum*[J], 2017, 877: 180
- [8] Cassada W A, Shiflet G J, Starke E A. *Metallurgical Transactions A*[J], 1991, 22(2): 299
- [9] Lu Yuan, Xu Zhuoqing, Xu Xiaochang *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2021, 14: 2523
- [10] Sang Fengjian(桑冯建), Zheng Ziqiao(郑子樵), Wang Haijin(王海金). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(3): 871
- [11] Mao Baiping(毛柏平), Yan Xiaodong(闫晓东), Shen Jian(沈健). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2015, 25(9): 6
- [12] Wu Liang, Li Xianfeng, Wang Haowei *et al. Materials Characterization*[J], 2021, 171: 110 800
- [13] Li Hongying, Huang Desheng, Kang Wei *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2016, 32(10): 1049
- [14] Terrones L, Monteiro S N. *Materials Characterization*[J], 2008, 58(2): 156
- [15] Huang Lanping(黄兰萍), Zheng Ziqiao(郑子樵), Huang Yongping(黄永平) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2004, 14(12): 2066
- [16] Ye Zhihao(叶志豪), Zhu Ruihua(朱瑞华), Li Jingfeng(李劲风) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(4): 7
- [17] Ovri H, Lilleodden E T. *Acta Materialia*[J], 2015, 89: 88
- [18] Yilmaz A. *Science and Technology of Advanced Materials*[J],

2011, 12(6): 63 001

[20] Raeisinia B, Poole W J, Lloyd D J *et al. Materials Science*

[19] Hou J P, Li R, Wang Q *et al. Journal of Materials Science*

*and Engineering A*[J], 2006, 420(1-2): 245

*Technology*[J], 2019, 35(5): 742

## Effect of Rolling Reduction per Pass on Microstructure and Mechanical Properties of 2197 Al-Li Alloy

Ji Hongliang<sup>1</sup>, Bian Liping<sup>1,2,3</sup>, Zheng Yi<sup>1</sup>, Liu Xianwen<sup>1</sup>, Liang Wei<sup>1,2</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(2. Shanxi Key Laboratory of Advanced Magnesium-based Materials, Taiyuan 030024, China)

(3. Engineering Research Center of Advanced Metal Composites Forming Technology and Equipment, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Aiming at the poor ductility, toughness and formability of Al-Li alloy, the effect of per-pass reduction on microstructure and mechanical properties of 2197 Al-Li alloy were studied by OM/SEM microstructure analysis, tensile properties and hardness/conductivity test, with a constant total reduction of 75%. The results show that the grain structure, the amount and distribution of precipitates are significantly affected by per-pass reduction. The strength of as-rolled alloy increases significantly with the increase of per-pass reduction, while the ductility and toughness decrease obviously. After T8 aging treatment, a large amount of precipitates are produced and the PLC (Portevin-Le Chatelier phenomenon) effect in the rolled alloy is eliminated. The mechanical properties of the alloy rolled by light and heavy reduction improve significantly. After aging treatment, as-rolled alloy with heavy reduction exhibits the optimal comprehensive mechanical properties with tensile strength of 384.94 MPa and the elongation to fracture of 12.45%, which are 2%, 21% and 29%, 31% higher than those of the light and middle reduction alloys, respectively.

**Key words:** Al-Li alloys; rolling; grain refinement; precipitates; mechanical properties

---

Corresponding author: Bian Liping, Ph. D., Professor, College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, Tel: 0086-351-6018398, E-mail: bianliping@tyut.edu.cn