



基于脉冲电磁场作用的2195铝锂合金形变热处理工艺研究

徐佳辉¹, 黄 亮¹, 徐毅珂¹, 谢冰鑫¹, 赵明杰¹, 王 煜², 李建军¹

(1. 华中科技大学 材料科学与工程学院 材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074;

2. 上海航天设备制造总厂, 上海 200245)

摘 要: 本文对比研究了传统形变热处理(TMT)与基于脉冲电磁场作用的形变热处理(TMTP), 后者工艺路径为固溶淬火-预拉伸-不发生形变的脉冲电磁场作用-人工时效。在脉冲电磁场作用过程中, 通过模具压板的位移约束以保证试样不发生塑性变形。结果表明: 两种形变热处理都能显著提升退火态试样的屈服强度, 其中TMTP条件下的屈服强度提升幅度更大, 达254.3%。同时, TMTP工艺下试样的伸长率略大于TMT工艺下试样的伸长率。透射电镜结果表明, 致密分布的析出相保证了两种形变热处理试样的强度。扫描电镜分析表明, TMT试样断口形貌为典型的沿晶断裂模式, 能观察到少量的韧窝。TMTP试样断口也是沿晶断裂模式, 但是韧窝数量较多。通过晶间析出相与晶界强度之间关系揭示了TMTP试样塑性提高的机理。

关键词: 铝锂合金; 形变热处理; 脉冲电磁场; 晶界析出相; 韧窝

文章编号: 1004-0609(2022)-06-1540-10

中图分类号: TG391

文献标志码: A

引文格式: 徐佳辉, 黄 亮, 徐毅珂, 等. 基于脉冲电磁场作用的2195铝锂合金形变热处理工艺研究[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(6): 1540-1549. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36772

XU Jia-hui, HUANG Liang, XU Yi-ke, et al. Research on thermomechanical treatment process of 2195 Al-Li alloy based on pulsed electromagnetic field treatment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(6): 1540-1549. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36772

2195铝锂合金具有密度低^[1]、比强度高^[2]等优异的综合性能优势, 在航天航空领域受到越来越多的关注^[3]。作为一种可热处理强化铝合金, 人们常通过形变热处理^[4]调控2195材料的性能。形变热处理铝锂合金的强度主要来源于弥散分布析出相的强化作用。例如WANG等^[5]研究表明人工时效之前添加预拉伸处理, 可以在基体中得到均匀分布的 T_1 析出相, 提高了材料的拉伸强度。因此, 2195铝锂合

金的形变热处理具有重要的研究价值。

近年来, 结合多物理场的形变热处理受到越来越多的关注。研究者在电场、磁场对材料力学性能和微观组织的影响方面做了很多研究工作。XIAO等^[6-9]系统性地研究电脉冲辅助联合预变形对5A09铝锂合金的时效行为以及力学性能的影响。结果表明, 相比于传统工艺, 所提出的新工艺可以增加 δ' 析出相的尺寸和体积分数, 并且加速析出相的析出速度, 从而显著提升合金的强度。SHOU

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51975229); 武汉市应用基础前沿项目(2020010601012178); 湖北省重点研发计划资助项目(2020BAB139); 中央高校基本科研业务费资助项目(2021JYCXJJ047)

收稿日期: 2021-06-25; **修订日期:** 2021-08-31

通信作者: 黄 亮, 教授, 博士; 电话: 027-87543490; E-mail: huangliang@hust.edu.cn

等^[10]研究发现, 电场时效下, 试样的强度和塑性同时提升, 材料的电导率也升高, 时效动力学得到加速。LIANG 等^[11]综述了电场诱导金属材料微观组织演变的机理, 总结了电场处理过程中热能量的来源主要有如下两方面: 焦耳能以及电子动量动能。周向龙等^[12]研究发现, 电磁成形后的时效处理可以缩短 7075 铝合金达到峰时效的时间。除此之外, 磁场对材料的微观组织演变的影响较为复杂。SHAO 等^[13]发现脉冲磁场处理能够提高合金钢的位错、析出相、磁力区的均匀性, 因此合金钢的疲劳性能更好。MA 等^[14]发现脉冲磁场处理以后, 高速钢的硬度增加。LI 等^[15]发现磁场处理可以使 TC4 合金的位错密度增加, 位错分布更加均匀, 因此材料强度略微升高。由此可见, 电场、磁场对材料的微观组织影响较为显著。但是, 作为一种结合多物理场的形变热处理方式, 基于脉冲电磁场作用的形变热处理对铝锂合金的析出相以及性能调控的影响方面, 相关的报道较少。

本文设计了基于脉冲电磁场作用的形变热处理工艺 (Thermomechanical treatment combined with pulsed electromagnetic field, TMTP), 即在传统的形变热处理 (Thermomechanical treatment, TMT) 工艺的预应变-人工时效之间加入不发生试样形变的强脉冲电磁场作用。通过对比 TMT 和 TMTP 工艺, 研究其对 2195 铝锂合金组织和性能的影响, 为铝锂合金变形热处理工艺提供理论依据。

1 实验

本实验的原始材料为 2195 铝锂合金喷射沉积板材。合金的名义化学成分如表 1 所示。材料的热处理工艺如图 1(a) 所示的工艺得到。首先通过电火花线切割得到退火态的标准拉伸试样, 试样的轴向与板料的挤压方向 (ED) 平行。室温拉伸试样尺寸如图 1(c) 所示, 依据 ASTM E8-M-04 标准确定试样的尺寸。此时得到的试样为退火态试样。

随后对退火态试样进行不同方式的形变热处理。首先在 505 °C 下进行 2 h 的固溶处理后水淬, 然后进行不同变形量的预拉伸变形, 最后在 190 °C 下进行人工时效处理 4.5 h。此时得到的试样为形变热处理态试样, 例如编号为 Q9A 代表的是预拉伸量为 9% 的形变热处理试样, Q0A 代表的是预拉伸

量为 0% 的形变热处理试样, 即传统的 T6 态试样。

TMTP 工艺是在预拉伸变形和人工时效之间加入不发生试样形变的脉冲电磁场作用。图 1(b) 所示为脉冲电磁场的模具示意图, 线圈由环氧树脂固定^[16], 与模具压板通过螺旋固定在一起, 通过模具压板的位移约束来保证试样不发生塑性变形。试样放置在线圈单侧中心偏外的 2 mm 处。利用脉冲产生器 (HMF-30/213-150) 通过线圈放电^[17-18], 在试样上产生瞬态变化的强脉冲电磁场^[19]。通过放电电压控制脉冲电磁场的大小^[20]。脉冲电磁场放电后, 进行人工时效热处理, 此时得到的试样为基于脉冲电磁场作用的形变热处理态试样, 例如编号为 Q9E10A 代表的是预拉伸量为 9% 后进行 10 kV 放电电压脉冲电磁场作用所得到的 TMTP 试样。

单向拉伸实验在实验机上完成, 拉伸速率为 2 mm/min。每组热处理条件下的试样重复三次实验, 统计屈服强度、抗拉强度和伸长率, 并取其平均值。切割拉伸试样时, 断口避免用水或油, 真空保存以保证断口新鲜。在 Sirion 200 扫描电镜观察断口形貌, 工作电压为 15 kV。透射电镜的试样使用 80% 甲醇+20% 硝酸溶液 (体积分数) 进行电解双喷减薄, 参数为 -30 °C 和 14V, 在 Tecnai G2 F30 设备进行观察。

表 1 2195 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of studied 2195 alloy sheet (mass fraction, %)

Cu	Mg	Li	Ag	Zr	Mn	Al
3.87	0.37	0.90	0.28	0.111	0.001	Bal.

2 结果与讨论

2.1 力学性能

退火态试样的应力-应变曲线如图 1 所示, 呈现典型的弹性变形-塑性变形-颈缩断裂行为。随着应变的增加, 应力显著增加, 接近于直线上升, 对应着弹性变形阶段, 应力-应变曲线的直线段的斜率为试样的弹性模量。随着变形的进行, 试样发生屈服, 在应力-应变曲线中体现为拐点的出现。在这之后, 应力的增加变得缓慢, 这对应着塑性变形阶段。应变进一步增加, 应力增加至峰值以后骤降, 对应着断裂阶段。材料的屈服强度和抗拉强度

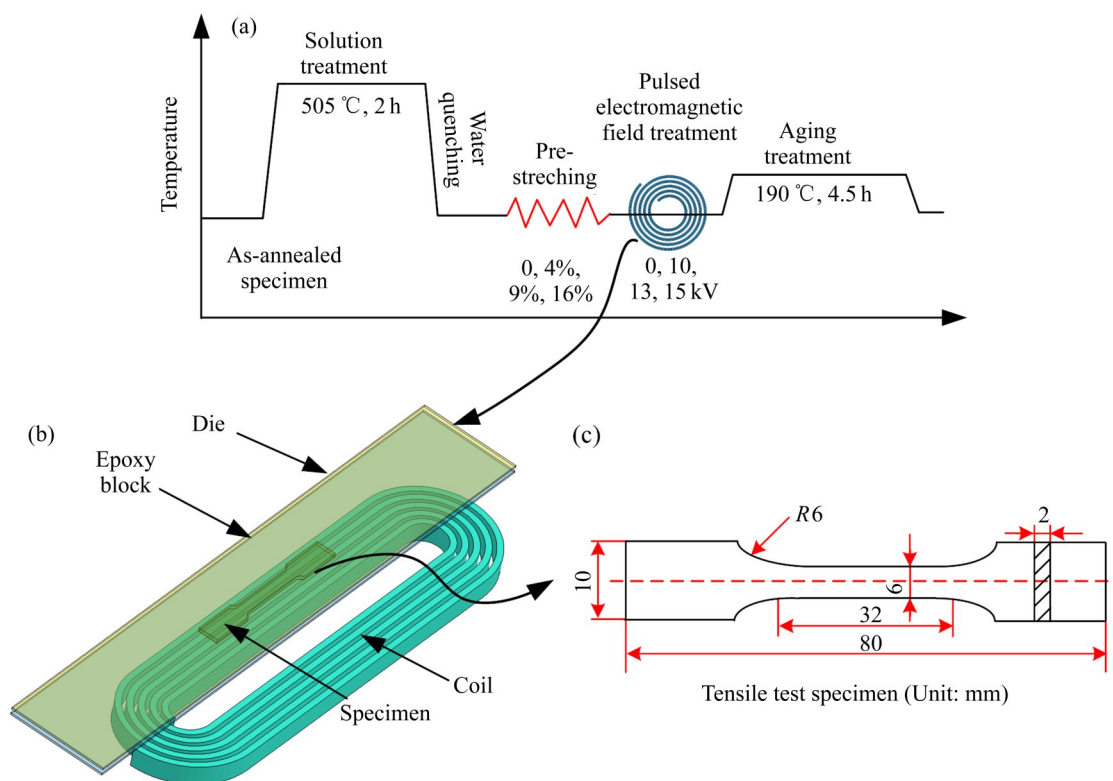


图1 试样的处理过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of preparation process of specimen: (a) Heat treatment process; (b) Pulse electromagnetic field treatment model; (c) Specimen sizes

分别为 (153.3 ± 0.9) MPa和 (294.7 ± 0.8) MPa、伸长率为 $(22.2 \pm 0.6)\%$ ，屈服强度到抗拉强度之间的差值代表了材料的加工硬化能力，从屈服强度到抗拉强度点，试样的应力值增加了141.4 MPa(92.2%)，这说明退火态材料的加工硬化能力较好。另外，从应力-应变曲线上可以观察到明显的应力锯齿现象。研究表明，在含铜和镁元素的铝合金塑性变形过程中，容易出现应力锯齿现象，即经典的PLC效应^[21-22]。关于PLC效应的起因，目前最为广泛接受是动态应变时效理论^[23]。动态应变时效理论认为塑性变形过程中，可动位错在运动过程中被障碍物(例如林位错、晶界)阻挡，引起临近区域的晶格畸变。在晶格畸变引发的应力场的作用下，溶质原子例如铜和镁原子通过扩散方式向位错偏聚，最终形成溶质原子气团^[24]。该气团对位错起到钉扎作用，变形抗力增加，在应力-应变曲线上体现为应力升高。随着变形的继续，外加应力增加到一定值使得位错发生脱钉扎，变形抗力降低，在应力-应变曲线上体现为应力降低。在上述所讨论的钉扎-脱钉扎过程中，形成了锯齿应力现象。

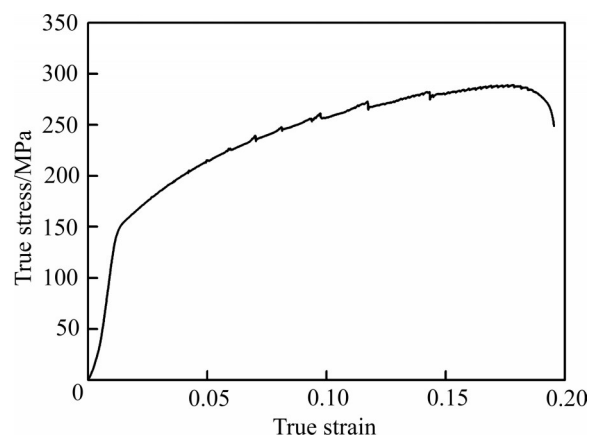


图2 退火态试样的应力-应变曲线

Fig. 2 True stress-strain curves of as-annealed specimens

两种形变热处理得到试样的应力-应变曲线如图3所示，形变热处理工艺下试样的应力-应变曲线也呈现典型的弹性变形-塑性变形-颈缩断裂行为。此外，可以发现PLC效应不明显。由前面的分析可知，材料中的铜和镁原子对PLC效应起到重要作用，而形变热处理后AA 2195材料内部的铜和镁原子大部分参与析出相的形成^[25-26]，处于稳定状

态, 因此, 变形过程中溶质原子不容易被释放出来。从而锯齿应力现象不明显。

统计比较了不同热处理状态下材料的屈服强度、抗拉强度和伸长率, 其结果如图 3~5 所示。随着预应变增加, 热处理后材料的屈服强度和抗拉强度增加, 伸长率降低。相比于退火态试样, Q9A 热处理可以提升材料的屈服强度和抗拉强度至 (520.6 ± 8.2) MPa 和 (587 ± 5.1) MPa, 提升率分别为 239.6% 和 99.5%, 这说明形变热处理的强化效果非常明显。TMTP 工艺下, 随着放电电压增加, 时效后材料的屈服强度和抗拉强度先增加后降低, 伸长率也是先增加后降低。在放电电压为 10 kV 时, 屈服强度、抗拉强度分别达到峰值 (543.1 ± 8.2) MPa、 (603.6 ± 4.3) MPa。相比于退火态试样, Q9E10A 试样的屈服强度和抗拉强度分别提升了 254.3% 和 104.8%。可以发现, TMTP 工艺也能显著提升材料

的强度, 且其提升率大于传统形变热处理的。同时, TMTP 工艺下得到的试样的伸长率 $(11.3\% \pm 0.9\%)$ 略大于传统形变热处理工艺得到的试样的伸长率 $(10.9\% \pm 0.4\%)$, 相比于 TMT 工艺, TMTP 工艺下材料的屈服强度和抗拉强度得到提升, 且伸长率略有升高, 以上结果体现了 TMTP 工艺的优势。

2.2 析出相形貌

为了研究脉冲电磁场对材料形变热处理后力学性能的影响机制, 本文通过透射电镜研究了不同形变热处理后得到试样的析出相。选取 Q0A、Q9A、Q9E10A 作为研究对象, 其详细的工艺条件如“材料和方法”章节所示。Q0A 试样观察到少量的析出相, 以及粗化的不连续晶界析出相 (Grain boundary precipitates, GBPs), 如图 6(a) 所示。相比而言, Q9A 试样中观察到致密分布的析出相, 如图 6(b) 所

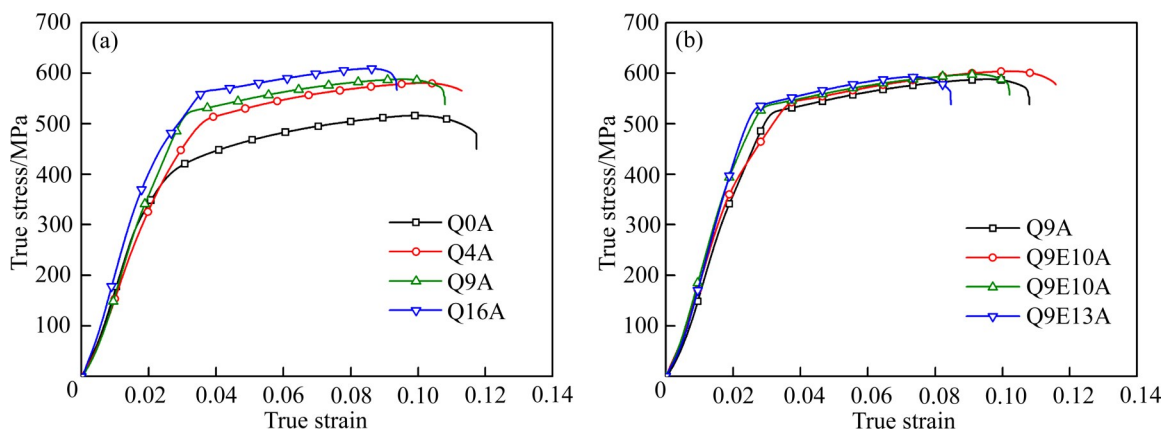


图3 不同形变热处理工艺下试样的应力-应变曲线

Fig. 3 True stress-strain curves for specimen under different thermomechanical treatment processes: (a) TMT; (b) TMTP

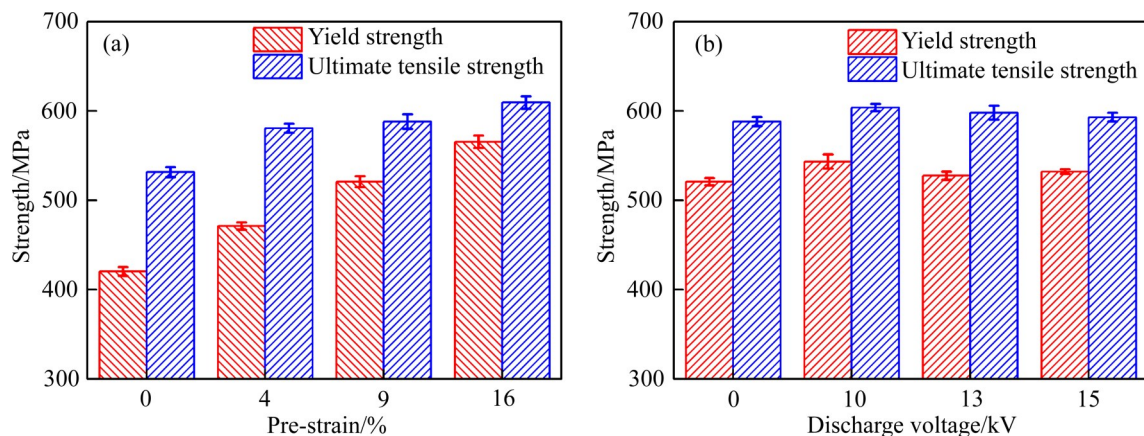


图4 不同形变热处理工艺下试样的屈服强度和抗拉强度

Fig. 4 Yield strength and ultimate tensile strength of specimen under different thermomechanical treatment processes: (a) TMT; (b) TMTP

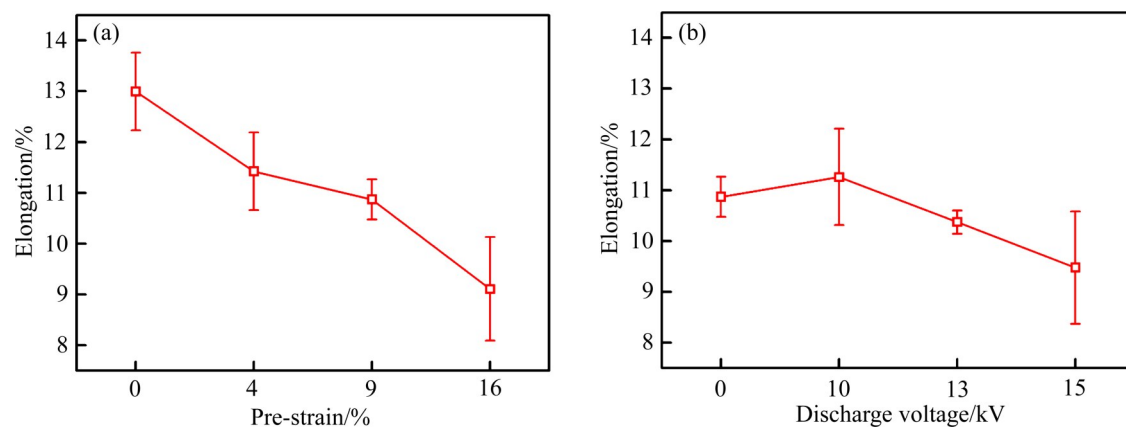


图5 不同形变热处理工艺下试样的伸长率

Fig. 5 Elongation of specimen under different thermomechanical treatment processes: (a) TMT; (b) TMTP

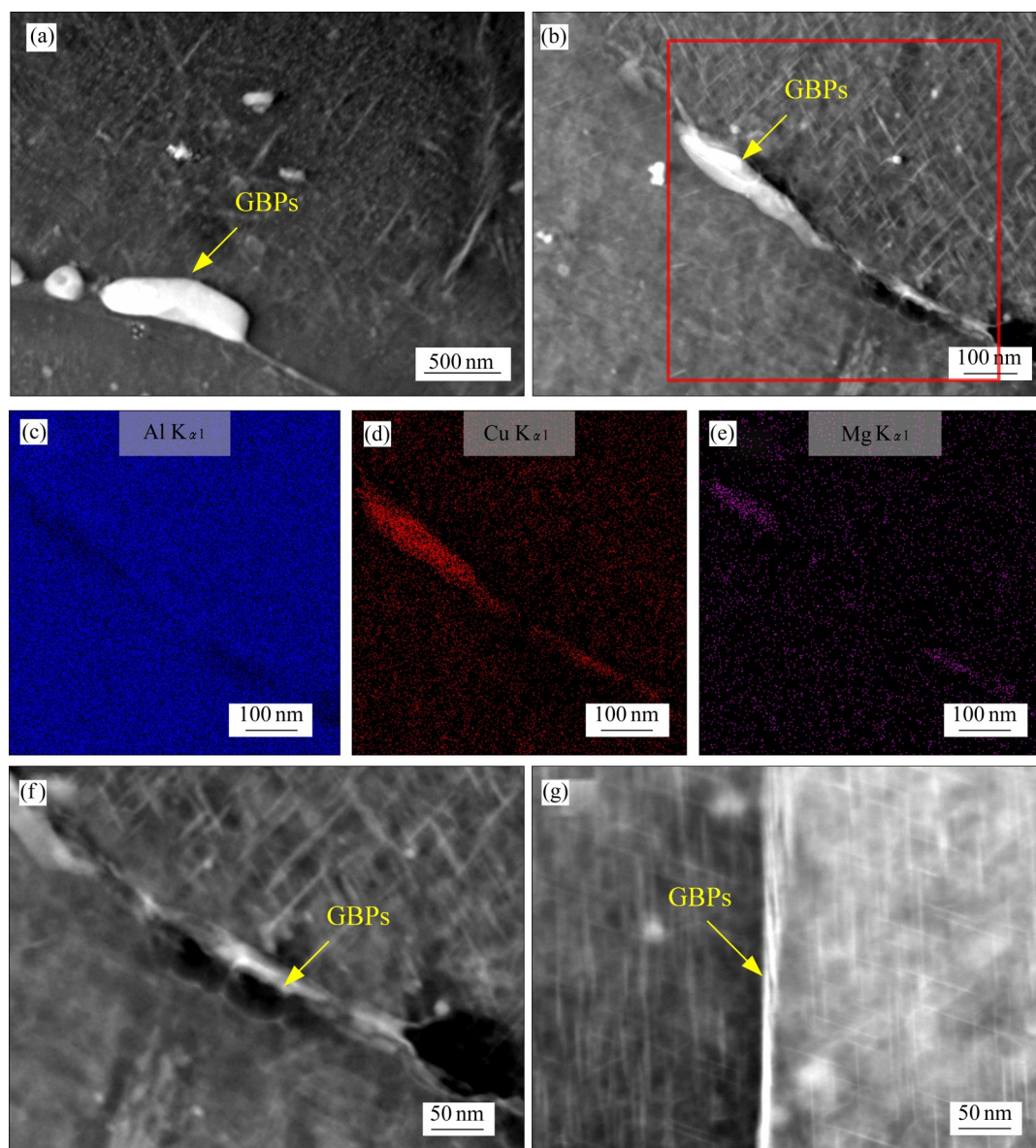


图6 不同形变热处理工艺下试样的TEM像

Fig. 6 TEM images of specimen under different thermomechanical treatment processes: (a) Q0A; (b)–(f) Q9A; (g) Q9E10A

示。这是由于预拉伸过程中引入大量位错^[27], 有利于析出相形核。盘片状析出相之间的角度约为 60° ^[28], 该角度为 T_1 析出相的经典取向^[29]。研究表明, 弧散分布的析出相有利于提升材料强度^[30], 因此, Q9A的屈服强度和抗拉强度分别达到 (520.6 ± 6.01) MPa和 (587.9 ± 8.1) MPa, 相比于Q0A试样, 分别提高了99.6 MPa和56.5 MPa。由此可以发现, 试样的屈服强度增量大于抗拉强度的, 材料的屈强比也得到提高, 这说明析出相与材料的屈服强度直接相关, 能够显著提高材料的屈服强度。图6(c)~(e)所示为图6(b)的Q9A试样红框范围所示晶界析出相的元素面扫描结果, 可以发现该晶界析出相为Al-Cu-Mg弥散相。塑性变形时, 位错发生增殖^[31-32], 其容易运动至局部性的晶界析出相处集中, 造成位错塞积现象。综上所述, 由于粗化的晶界析出相的存在, 减小了晶界强度并且容易造成应力集中, 使得塑性变形硬化阶段更加容易发生裂纹萌生和发展, 材料更加容易发生断裂失效, 因此试样的伸长率更低。

如图6(g)所示, Q9E10A试样中也观察到致密分布的晶内析出相, 与Q9A试样的相似, 也是典型的 T_1 析出相特征^[33]。与Q9A试样相比, Q9E10A试样的 T_1 析出相的厚度较薄, 且分布更加致密, 如图6(f)、(g)所示。细小弧散的析出相有利于提高试样的强度, 以上结果与Q9E10A试样具有更高的屈服强度结果相吻合。位错是析出相异质形核质点^[5], 因此, 析出相的分布行为与位错分布行为直接相关。有研究^[10]表明, 脉冲磁场处理可以使得位错分布更加均匀。本实验中, Q9A与Q9E10A试样

在制备的过程中都经历9%的预拉伸处理, 晶粒内部和晶界位置存在大量位错。所不同的是, Q9E10A试样经历脉冲电磁场处理, 其位错可能发生均匀化分布, 从而析出相形核与长大更加均匀, 因此, 其表现为更加细小弥散的析出相分布。除此之外, Q9E10A试样中也观察到较为连续且较窄的晶界析出相, 这与晶界处位错均匀化相关。由前分析可知, 晶界析出相的存在会弱化晶界并且容易成为裂纹源。此时, 晶界析出相的连续化和窄化是有利的, 这使得晶界强度弱化作用降低。并且塑性变形过程中位错均匀分布在晶界和晶界析出相处, 减弱了应力集中现象, 从而降低了裂纹的萌生扩展。因此在性能上体现为, 相比于Q9A试样, Q9E10A的材料强度和伸长率进一步得到提高。

2.3 断口形貌

图7所示为退火态试样单向拉伸断口的SEM像。由图7可以观察到大量大小不一的韧窝交叉存在, 韧窝尺寸较深较大, 说明试样韧性较好^[34]。退火态试样的断裂模式为微孔聚集型, 在塑性变形过程中, 材料内部的微孔洞逐渐形核、长大并不断聚合, 最终导致材料的断裂。此外, 很多韧窝底部都能观察到第二相粒子, 说明韧窝大部分是由第二相作为源头而萌生的。通过能谱分析可知, 韧窝底部是Al-Cu-Mg粒子, 与文献[5]中的结果相吻合。

图8所示为热处理后的试样的单向拉伸断口的SEM像。由图8可以观察到Q0A试样的断口为典型的沿晶断裂特征, 晶间断裂面上存在很多韧窝, 如图8(a)和(b)所示。相比而言, Q9A试样的断口表现

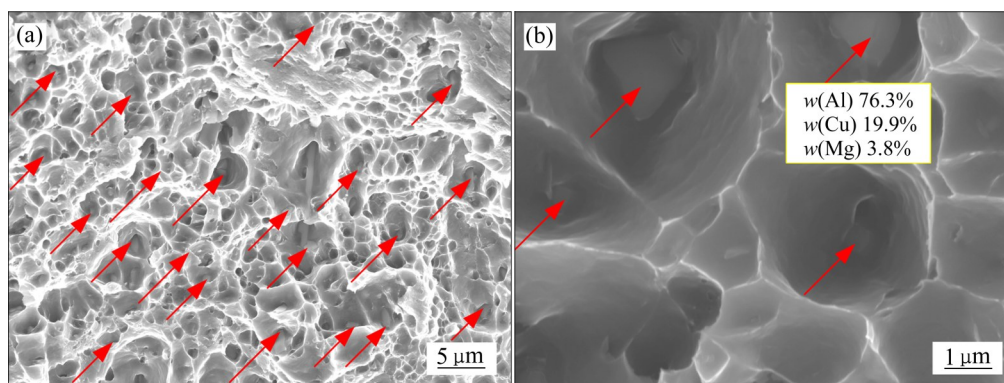


图7 退火态试样的拉伸断口形貌

Fig. 7 Tensile fracture morphologies of as-annealed specimen: (a) Low magnification; (b) High magnification

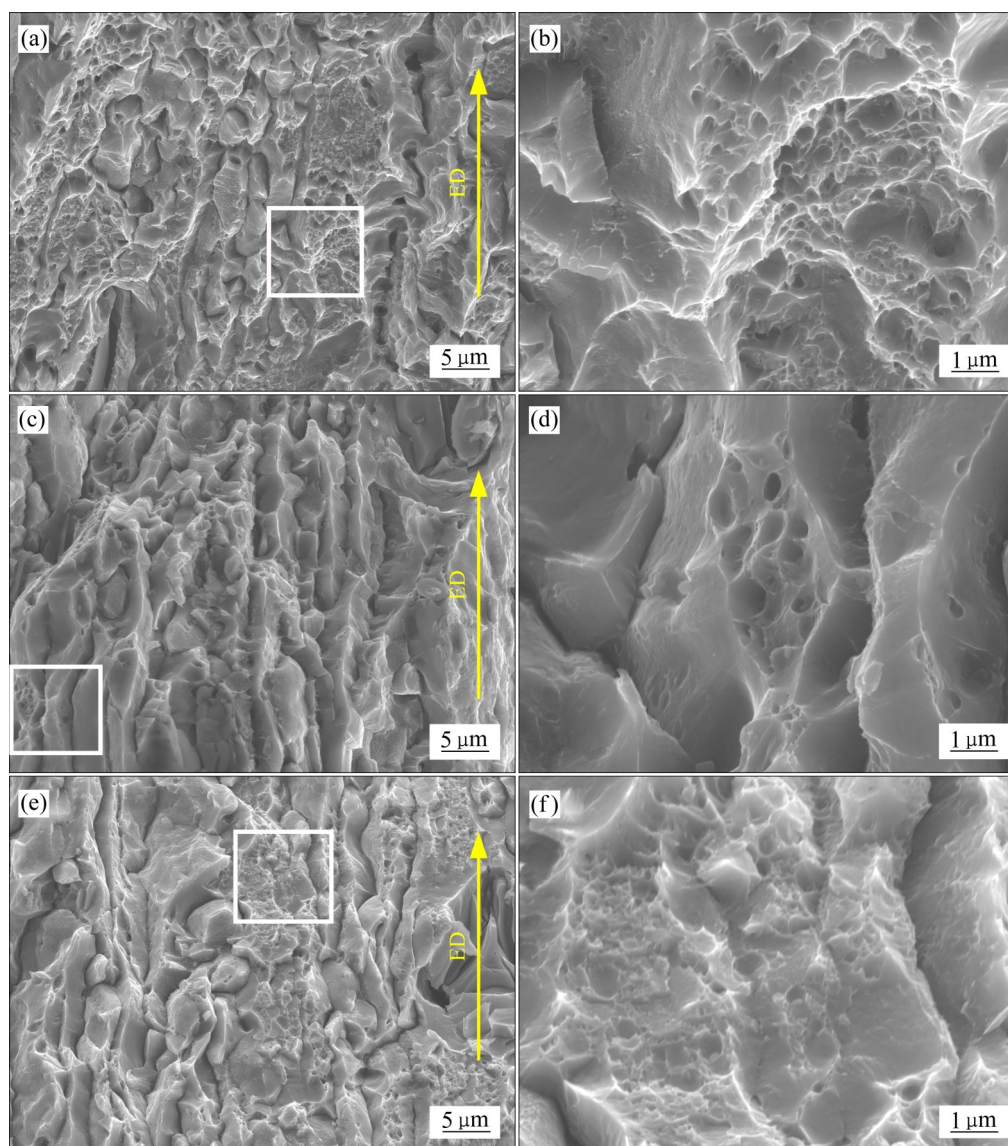


图8 不同形变热处理工艺下试样的拉伸断口形貌

Fig. 8 Tensile fracture morphologies of specimen under different thermomechanical treatment processes: (a), (b) Q0A specimen; (c), (d) Q9A specimen; (e), (f) Q9E10A

为更加明显沿晶断裂特征，断裂面上韧窝数量较少，如图8(c)和(d)所示。有前文析出相分析可知，Q9A试样中弥散分布的析出相保证了晶内的强度，同时粗化的晶间析出相弱化了晶界强度。因此断裂过程中，裂纹主要在晶界处萌生，从而观察到的韧窝数量显著降低，直观表现为试样的塑性下降。此外，Q9E10A试样的断口形貌也体现为沿晶断裂特征，但是断裂面上的韧窝数量较Q9A试样的更多。由图6分析可知，Q9E10A试样的晶间析出相出现连续化和窄化的趋势，因此，塑性变形过程中，位错较为均匀地分布在晶间析出相上。除此之外，由

上文分析可知，Q9E10A试样中晶间析出相的连续化和窄化有利于降低晶界处裂纹的萌生。因此，裂纹倾向在晶间及晶内混合萌生，能观察到更多的韧窝，从而使得Q9E10A试样的塑性更好。

3 结论

1) 相比于退火态试样，TMT工艺将材料的屈服强度提高了239.6%，而TMTP工艺可将材料的屈服强度提高了254.3%。同时，TMTP试样的伸长率($11.3 \pm 0.9\%$)略大于传统形变热处理工艺下试样的

伸长率($10.9\pm 0.4\%$)。

2) 致密分布的析出相保证了两种形变热处理试样的强度。TMTP试样晶界析出相的连续化和窄化,延缓位错聚集以及弱化晶界强度,是TMTP相比TMT试样强度进一步提升的重要原因。

3) 形变热处理试样断口形貌为典型的沿晶断裂模式,观察到少量的韧窝,这与粗大晶间析出相的晶界强度弱化作用有关。TMTP试样断口也是沿晶断裂模式,但是韧窝数量较多。晶间析出相的连续化和窄化可延缓晶间裂纹萌生,是TMTP试样塑性较好的重要原因。

REFERENCES

- [1] 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.
LI Jin-feng, NING Hong, LIU Dan-yang, et al. Alloying and micro-alloying in Al-Cu-Li series alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals. 2021, 31(2): 258-279.
- [2] MA P, ZHAN L, LIU C, et al. Pre-strain-dependent natural ageing and its effect on subsequent artificial ageing of an Al-Cu-Li alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 790: 8-19.
- [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.
WANG Yi-chang, TONG Xin, YOU Guo-qiang, et al. Research progress and prospects of the microstructures, properties, and forming techniques of Al-Li alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(3): 1069-1083.
- [4] RIOJA R J, LIU J. The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43(9): 3325-3337.
- [5] WANG Y X, ZHAO G Q, XU X, et al. Microstructures and mechanical properties of spray deposited 2195 Al-Cu-Li alloy through thermo-mechanical processing[J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 727: 78-89.
- [6] XIAO H, JIANG S S, SHI C C, et al. Study on the microstructure evolution and mechanical properties of an Al-Mg-Li alloy aged by electropulsing assisted ageing processing[J]. Materials Science and Engineering A, 2019, 756: 442-454.
- [7] XIAO H, ZHANG K F, SHI C C, et al. Influence of electropulsing treatment combined with pre-deformation on ageing behavior and mechanical properties of 5A90 Al-Li alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 784: 1234-1247.
- [8] XIAO H, JIANG S, ZHANG K, et al. Optimizing the microstructure and mechanical properties of a cold-rolled Al-Mg-Li alloy via electropulsing assisted recrystallization annealing and ageing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 814: 152257.
- [9] XIAO H, LU Z, ZHANG K F, et al. Achieving outstanding combination of strength and ductility of the Al-Mg-Li alloy by cold rolling combined with electropulsing assisted treatment[J]. Materials & Design, 2020, 186: 108279.
- [10] SHOU W B, YI D Q, YI R W, et al. Influence of electric field on microstructure and mechanical properties of an Al-Cu-Li alloy during ageing[J]. Materials & Design, 2016, 98: 79-87.
- [11] LIANG C L, LIN K L. The microstructure and property variations of metals induced by electric current treatment: A review[J]. Materials Characterization, 2018, 145: 545-555.
- [12] 周向龙, 黄长清, 崔晓辉, 等. 时效工艺对电磁成形7075铝合金组织与性能的影响[J]. 锻压技术, 2020, 45(10): 163-170.
ZHOU Xiang-long, HUANG Chang-qing, CUI Xiao-hui, et al. Influence of aging process on microstructure and properties of 7075 aluminum alloy by electromagnetic forming[J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45(10): 163-170.
- [13] SHAO Q, WANG G, WANG H, et al. Improvement in uniformity of alloy steel by pulsed magnetic field treatment[J]. Materials Science and Engineering A, 2021, 799: 140143.
- [14] MA L, ZHAO W, LIANG Z, et al. An investigation on the mechanical property changing mechanism of high speed steel by pulsed magnetic treatment[J]. Materials Science and Engineering A, 2014, 609: 16-25.
- [15] LI G R, QIN T, FEI A G, et al. Performance and microstructure of TC4 titanium alloy subjected to deep cryogenic treatment and magnetic field[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 802: 50-69.
- [16] LUO W Y, HUANG L, LI J J, et al. A novel multi-layer coil for a large and thick-walled component by electromagnetic forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2811-2819.
- [17] LI J J, QIU W, HUANG L, et al. Gradient electromagnetic forming (gemf): A new forming approach for variable-diameter tubes by use of sectional coil[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 135: 65-77.

- [18] XIAO W, HUANG L, LI J, et al. Investigation of springback during electromagnetic-assisted bending of aluminium alloy sheet[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105(1/2/3/4): 375–394.
- [19] ZHANG Q X, HUANG L, LI J J, et al. Investigation of dynamic deformation behaviour of large-size sheet metal parts under local lorentz force[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 265: 20–33.
- [20] SU H L, HUANG L, LI J J, et al. Formability of AA 2219-O sheet under quasi-static, electromagnetic dynamic, and mechanical dynamic tensile loadings[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 70: 125–135.
- [21] 董国疆, 孙宇飞, 樊博成, 等. 自然时效对 AA7075 板材锯齿形屈服行为的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(3): 578–589.
- DONG Guo-jiang, SHUN Yu-fei, FAN Bo-cheng, et al. Effect of natural aging on portevin-le chatelier effect of AA7075 sheet[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(3): 578–589.
- [22] 孙亮, 张青川, 江慧丰. 溶质浓度对 Al-Cu 合金中 PLC 效应的影响[J]. *金属学报*, 2006, 42(12): 1248–1252.
- SUN Liang, ZHANG Qing-chuan, JIANG Hui-feng, et al. Influence of solute concentration on PLC effect in Al-Cu alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2006, 42(12): 1248–1252.
- [23] 马鹏程. 5xxx 系铝合金板材的组织 and 织构对其成形性和锯齿屈服行为的影响[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- MA Peng-cheng. Effect of microstructure and texture on the formability and serrated deformation behavior of 5xxx series aluminum alloy[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.
- [24] CURTIN W A, OLMSTED D L, HECTOR L G, Jr. A Predictive mechanism for dynamic strain ageing in aluminium-magnesium alloys[J]. *Nature Materials*, 2006, 5(11): 875–880.
- [25] DESCHAMPS A, GARCIA M, CHEVY J, et al. Influence of Mg and Li content on the microstructure evolution of AlCuLi alloys during long-term ageing[J]. *Acta Materialia*, 2017, 122: 32–46.
- [26] GUMBMAN E, DE GEUSER F, SIGLI C, et al. Influence of Mg, Ag and Zn minor solute additions on the precipitation kinetics and strengthening of an Al-Cu-Li alloy[J]. *Acta Materialia*, 2017, 133: 172–185.
- [27] 袁珍贵, 陈志国, 李鸿娟, 等. 新型热机械处理调控 Al-Zn-Mg-Cu 合金微观组织与综合性能的机理[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(2): 280–288.
- YUAN Zhen-gui, CHEN Zhi-guo, LI Hong-juan, et al. Mechanism of novel thermomechanical treatment on microstructure and comprehensive properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(2): 280–288.
- [28] ZHANG L, ZHENG Z Q, LI J F, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of a new Al-Cu-Li-X alloy at different solution temperatures[J]. *Rare Metals*, 2021, 40(3): 635–642.
- [29] WANG X M, SHAO W Z, JIANG J T, et al. Quantitative analysis of the influences of pre-treatments on the microstructure evolution and mechanical properties during artificial ageing of an Al-Cu-Li-Mg-Ag alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*. 2020, 782: 139253.
- [30] 刘晨, 李劲风, 宁红, 等. 2060 铝锂合金的淬透性[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(11): 2451–2458.
- LIU Chen, LI Jin-feng, NING Hong, et al. Hardenability of 2060 Al-Li alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(11): 2451–2458.
- [31] ZHAO M J, HUANG L, ZENG R, et al. In-situ observations and modeling of metadynamic recrystallization in 300 M steel[J]. *Materials Characterization*, 2020, 159: 109997.
- [32] WEI X X, JIN L, WANG F H, et al. High strength and ductility Mg-8Gd-3Y-0.5Zr alloy with bimodal structure and nano-precipitates[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 44: 19–23.
- [33] DUAN S W, MATSUDA K, WANG T, et al. Microstructures and mechanical properties of a cast Al-Cu-Li alloy during heat treatment procedure[J]. *Rare Metals*, 2021, 40(7): 1897–1906.
- [34] ZHU H, HUANG L, WANG Z Y, et al. Fracture behaviour of laser-welded 2219-T6 aluminium alloy under pulsed lorentz force[J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(13): 9857–9874.

Research on thermomechanical treatment process of 2195 Al-Li alloy based on pulsed electromagnetic field treatment

XU Jia-hui¹, HUANG Liang¹, XU Yi-ke¹, XIE Bing-xin¹, ZHA Ming-jie¹, WANG Yu², LI Jian-jun¹

(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology,
School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan 430074, China;

2. Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer, Shanghai 200245, China)

Abstract: The thermomechanical treatment (TMT) and thermomechanical treatment combined with pulsed electromagnetic field (TMTP) were carried out. The latter process is solution treatment and quench, following by pre-stretching, pulsed electromagnetic field treatment without deformation, and artificial aging. During the pulsed electromagnetic field treatment, the displacement constraint of the die plate is used to ensure that no plastic deformation occurs in the specimen. The results show that the two thermomechanical treatment processes can significantly increase the yield strength of the as-annealed specimens, and the increment of yield strength of the specimen under TMTP condition is greater, which reaches 254.3%. At the same time, the elongation of the TMTP specimen is slightly larger than the TMT one. TEM results show that the densely distributed precipitates ensure the strength of the specimens under two TMT conditions. SEM results show that the fracture morphology of the TMT specimen is typical intergranular fracture combined with a small number of dimples, while the TMTP one is intergranular fracture combined with more dimples. Through the relationship between the grain boundary precipitates and the strength of the grain boundary, the mechanism of the plasticity improvement for TMTP specimen was revealed.

Key words: Al-Li alloy; thermomechanical treatment; pulse electromagnetic field; grain boundary precipitates; dimples

Foundation item: Project(51975229) supported by National Natural Science Foundation of China; Project (2020010601012178) supported by Wuhan Planning Project of Science and Technology, China; Project(2020BAB139) supported by Key Research and Development Program of Hubei Province, China; Project(2021JYCXJJ047) supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities, Huazhong University of Science and Technology, China

Received date: 2021-06-25; **Accepted date:** 2021-08-31

Corresponding author: HUANG Liang; Tel: +86-27-87543490; E-mail: huangliang@hust.edu.cn

(编辑 李艳红)