

## 航空航天铝锂合金开发及其研究进展

刘志鹏<sup>1,3</sup>, 肖阳<sup>2,3</sup>, 马凯杰<sup>3</sup>, 廖荣跃<sup>3</sup>, 王俊超<sup>1,2</sup>, 孙玉峰<sup>1</sup>, 关绍康<sup>1</sup>  
(1. 郑州大学材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学中原关键金属实验室, 河南 郑州 450001; 3. 郑州轻研合金科技有限公司, 河南 郑州 450041)

**摘要:** 铝锂合金是航空航天领域的关键结构材料,微合金化和形变热处理可实现第二相细小且均匀析出,是制备高强高韧铝锂合金最有潜力的工艺方案。本文介绍了高强变形铝锂合金、铸造铝锂合金、超塑性铝锂合金等航空航天铝锂合金3个主要研究方向涉及的形变热处理、微合金化、再结晶退火等方面的研究进展,为新一代航空航天铝锂合金开发和应用提供参考。最后提出了我国在航空航天铝锂合金相关研制方面的不足以及未来的重点开发方向。

**关键词:** 铝锂合金; 析出强化; 形变热处理; 微合金化; 超塑性

**中图分类号:** TG146.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6264(2023)11-0008-10

### Development and research progress of aerospace Al-Li alloys

LIU Zhi-peng<sup>1,3</sup>, XIAO Yang<sup>2,3</sup>, MA Kai-jie<sup>3</sup>, LIAO Rong-yue<sup>3</sup>, WANG Jun-chao<sup>1,2</sup>,  
SUN Yu-feng<sup>1</sup>, GUAN Shao-kang<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;  
2. Zhongyuan Critical Metals Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;  
3. Zhengzhou Light Alloy Institute Co Ltd, Zhengzhou 450041, China)

**Abstract:** Al-Li alloy is one type of the key structural materials in the field of aerospace. Microalloying and thermomechanical treatment can achieve fine and uniform precipitation of the second phase, making it the most promising process route for preparing Al-Li alloys with high strength and high toughness. This article introduces the research progress in thermomechanical treatment, microalloying and recrystallization annealing related to the three main research directions of aerospace aluminum lithium alloys, including high-strength wrought Al-Li alloys, cast Al-Li alloys and superplastic Al-Li alloys, providing reference for the development and application of the new generation of aerospace Al-Li alloys. Finally, the shortcomings in the research and development of aerospace Al-Li alloys in China and future key development directions are proposed.

**Keywords:** Al-Li alloy; precipitation strengthening; thermomechanical treatment; microalloying; superplastic

铝合金中每添加1%的锂,密度降低3%,采用铝锂合金代替常规的高强铝合金可使关键器件结构重量减轻20%,强度提高20%,弹性模量提高20%,实现武器装备的轻量化,满足其高精度、超远程、超高速打击的发展需求。铝锂合金作为一种轻质、高强和耐腐蚀的金属结构材料,具有密度低、弹性模量高、比强度高和比刚度高、疲劳性能好、耐腐蚀等优良特性,密

度为2.47~2.72 g/cm<sup>3</sup>,强度介于380~650 MPa之间,属于军用关键结构材料,在航空、航天领域具有十分广阔的应用前景。因此,铝锂合金一直是航空航天结构材料领域的研究热点。

国外铝锂合金的发展到现在大致可以分为3个阶段,每个阶段都会出现符合当时发展所需要的Al-Li系合金,可将铝锂合金分为Al-Mg-Li和Al-Cu-

收稿日期: 2023-08-18 修订日期: 2023-08-30

基金项目: 预研基金(41422010607,50922010302)

作者简介: 刘志鹏(1991—),男,工程师,博士研究生,主要研究方向为先进轻合金材料开发,E-mail: lzp0925@126.com。

通信作者: 关绍康(1962—),男,教授,博士,主要研究方向为先进轻合金材料设计、制备及精密加工,电话:0371—67783011,E-mail: skguan@zzu.edu.cn。

引用格式: 刘志鹏,肖阳,马凯杰,等. 航空航天铝锂合金开发及其研究进展[J]. 材料热处理学报,2023,44(11):8-17.

LIU Zhi-peng, XIAO Yang, MA Kai-jie, et al. Development and research progress of aerospace Al-Li alloys[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(11):8-17.

Li 两个成分系列, Al-Mg-Li 系主要为俄罗斯发展的铝锂合金系列; 欧美 Al-Cu-Li 系铝锂合金, Cu 和 Li 均为其主合金元素, 该系列也是铝锂合金发展的主流。国内铝锂合金的研究相较于美国、俄罗斯等国家起步晚, 20 世纪 80 年代开始进行铝锂合金的材料研究, 初期以跟踪仿制为主, 在俄罗斯 Al-Mg-Li 系合金 1420 成分基础上, 开发了国产化牌号 5A90 铝锂合金, 由于其密度优势明显, 随着工艺逐渐稳定, 已在多个型号实现应用。进入 21 世纪后我国逐渐加大了自主开发力度, 研制出具有自主知识产权的第三代 2A97 和 X2A66 铝锂合金, 不同铝锂合金成分及密度特征如图 1 所示<sup>[1-2]</sup>, 新一代的铝锂合金不再一味追求低密度, 更多考虑其综合力学性能。随着近年来航空、航天领域的需求牵引, 国内再次掀起了铝锂合金的研究热潮, 十三五期间取得了一系列显著研究成果, 根据不同应用场景和使用需求, 研制了高强耐损伤抗疲劳铝锂合金、高强铸造铝锂合金和可超塑成形铝锂合金。

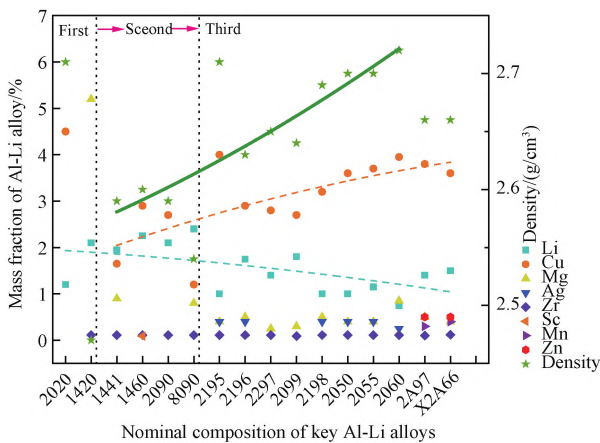


图 1 铝锂合金牌号开发趋势<sup>[1-2]</sup>

Fig. 1 Development trend of Al-Li alloys grades<sup>[1-2]</sup>

铝锂合金是可热处理强化合金, 在一定温度下处于过饱和状态的元素从基体中弥散析出, 形成有效阻碍位错运动的析出相而获得时效强化。时效强化效果与铝锂合金中第二相的析出行为以及析出相的成分、类型、数量、形状、尺寸和分布有关, 沿晶界析出的粗大平衡相以及在晶界处形成的无沉淀析出带 (PFZ) 会急剧恶合金性能, 而弥散、细小且均匀析出的第二相则可以显著改善合金性能。合金化和形变热处理工艺可实现对析出相的调控, 是提升铝锂合金强度、塑性和综合性能的有效手段。主元素含量和比例会改变铝锂合金的时效析出序列和主要强化相

种类, 微合金元素会引入新的强化相, 辅助元素的添加可在一定程度调节铝锂合金塑性和综合性能, 形变热处理工艺可改变析出序列, 影响析出相的数量、形状、尺寸和分布等。鉴于铝锂合金成分设计和热处理工艺调控的复杂性和重要性, 本文综述了国内外高强变形铝锂合金强韧化、铸造铝锂合金强韧化、铝锂合金超塑性等 3 个主要研究方向涉及的形变热处理、微合金化、再结晶退火等方面研究进展, 为新一代航空航天铝锂合金开发和应用提供参考。

## 1 高强变形铝锂合金开发

铝锂合金经过三轮迭代发展至今近百年历史, 现有成熟的合金牌号均为变形铝锂合金, 第三代 Al-Cu-Li 系合金由于其较高的力学性能和优良的综合性能, 逐渐取代 Al-Mg-Li 系合金成为主流。Al-Cu-Li 系合金主要强化相包括  $T_1$  ( $Al_2CuLi$ )、 $\delta'$  ( $Al_3Li$ ) 和  $\theta'$  ( $Al_2Cu$ ) 相。 $T_1$  相呈圆盘状, 在铝基体  $\{111\}_{Al}$  面析出, 与铝基体保持半共格关系,  $\theta'$  相呈圆盘状, 在铝基体  $\{100\}_{Al}$  面析出, 也与铝基体保持半共格关系,  $\delta'$  相晶体结构为立方超点阵晶体结构, 呈球状, 与铝基体完全共格。析出相形貌和衍射斑点如图 2 所示<sup>[3]</sup>。

面心立方 (fcc) 的铝基体在  $\{111\}$  晶面上排列最为紧密, 原子间距最小, 晶面滑移主要在  $\{111\}$  面上进行,  $T_1$  相在  $\{111\}$  晶面上呈椭圆盘状析出, 强化效果最为显著<sup>[4-5]</sup>。 $\theta'$  相与铝基体保持半共格关系, 在含 Cu 铝锂合金中的  $\{100\}$  晶面上呈椭圆盘状析出, 且其纵横比大, 同样能起到较为显著的强化效果, 强化效果仅次于  $T_1$  相<sup>[6-7]</sup>。板条状的  $S'$  ( $Al_2CuMg$ ) 相强化效果一般,  $T_2$  ( $Al_6CuLi_3$ ) 相和  $T_B$  ( $Al_{7.5}Cu_4Li$ ) 相为晶间脆性相, 对合金性能有害。在铝锂合金中添加微量 Zr、Sc 元素, 会析出  $\beta'$  ( $Al_3Zr$ ) 相, Sc 可与 Zr 元素形成三元共格相  $Al_3(Sc_{1-x}Zr_x)$ , 成为时效过程中  $\delta'$  相的非均匀形核的核心, 形成  $Al_3Li/Al_3(Sc, Zr)$  复合粒子, 改变主要强化相  $T_1$ 、 $\delta'$ 、 $\theta'$  相的形貌、尺寸和分布<sup>[8-9]</sup>。此外, Zr、Sc 元素形成的复合粒子可以钉扎在晶界附近, 抑制晶粒长大, 获得较好细晶强化效果。如图 3 所示为变形铝锂合金中的主要析出相形貌和分布。

形变热处理可以调控时效过程中析出相的种类、分布和析出序列, 通过合理的形变热处理制度可以改善合金的微观组织, 是提升铝锂合金力学性能的最有效的工艺方法之一。根据形变在加工过程中的位置可分为中间形变热处理 (ITMT) 和最终形变热处理

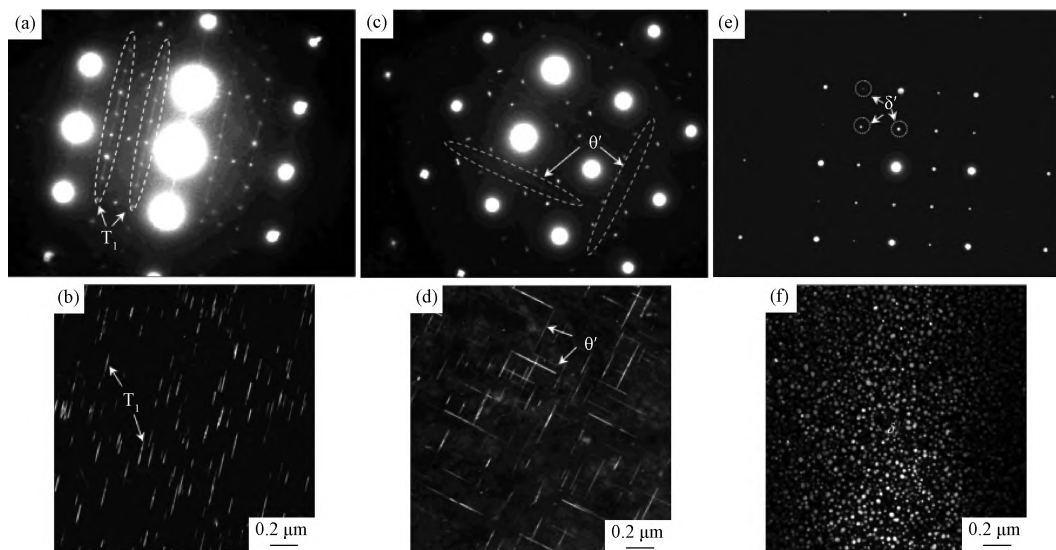


图2 Al-Cu-Li系铝锂合金 SAED 谱及时效析出相的 TEM-DF 照片<sup>[3]</sup>

(a)  $[112]_{\text{Al}}$  SAED 谱; (b)  $T_1$  相  $\langle 112 \rangle_{\text{Al}}$  方向 TEM-DF 照片; (c)  $[100]_{\text{Al}}$  SAED 谱; (d)  $\theta'$  相  $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$  方向 TEM-DF 照片; (e)  $[100]_{\text{Al}}$  SAED 谱; (f)  $\delta'$  相  $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$  方向 TEM-DF 照片

Fig. 2 SAED patterns and TEM-DF images of aged precipitates in the Al-Cu-Li alloys<sup>[3]</sup>

(a)  $[112]_{\text{Al}}$  SAED pattern; (b) TEM-DF image of  $T_1$  precipitate at  $\langle 112 \rangle_{\text{Al}}$  direction; (c)  $[100]_{\text{Al}}$  SAED pattern; (d) TEM-DF image of  $\theta'$  precipitate at  $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$  direction; (e)  $[100]_{\text{Al}}$  SAED pattern; (f) TEM-DF image of  $\delta'$  precipitate at  $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$  direction

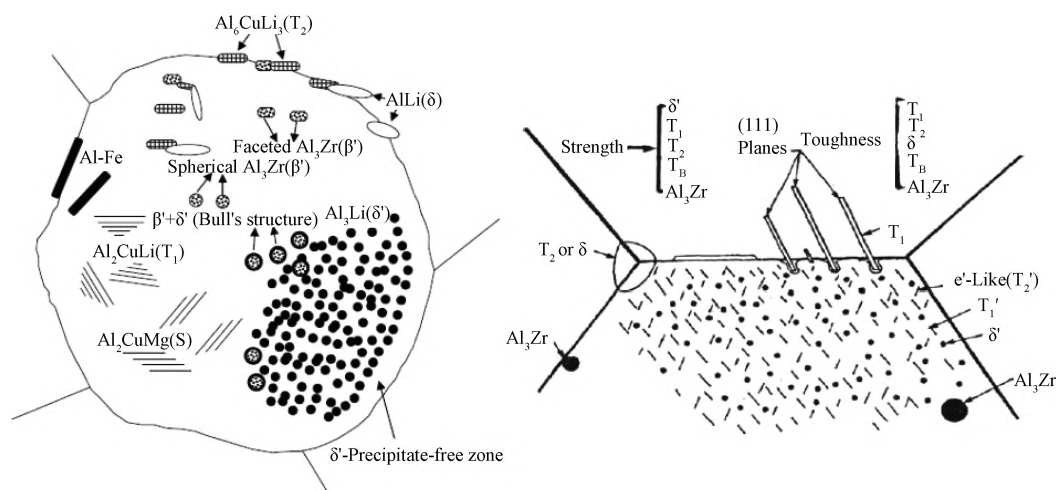


图3 铝锂合金典型析出相形貌和分布特征<sup>[2]</sup>

Fig. 3 Morphology and distribution of typical precipitates in Al-Li alloys<sup>[2]</sup>

(FTMT)。

ITMT 通常是均匀化热处理后进行轧制,以改善其微观组织、细化晶粒。Munoz-Morris 等<sup>[10]</sup>研究了 Al-2.8%Cu-1.6%Li 合金在高温下大变形轧制对后续热处理过程中微观组织与力学性能的影响,结果表明在 150~200 °C 的轧制温度下未观察到沉淀相,而在 300~400 °C 轧制时,由于初生相在轧制过程中受到严

重变形而破碎,从而导致细小弥散的  $T_1$  沉淀相析出,合金伸长率随轧制温度的升高逐渐增加。Gairola 等<sup>[11]</sup>报道了低温轧制和变形后退火对 8090 铝锂合金拉伸和断裂行为的影响。低温轧制和退火后合金的拉伸和断裂性能的改善可归因于  $S'$  和  $\delta'$  相的析出。Medjahed 等<sup>[12]</sup>研究了冷轧方向对 Al-Cu-Li-Mg-X 合金微观结构和各向异性的影响,选择与原热轧方

向成 0°、45°、90° 三种冷轧方向对板材进行轧制, 发现冷轧方向会影响析出相种类, 当合金沿 0° 方向轧制时, 主要析出相是 δ', 其次是 δ'/β' 和 T<sub>1</sub> 相; 在 90° 轧制方向下, 主要是 δ'/β' 复合相, 还有少量 δ' 相; 在沿 45° 方向轧制的合金中, 主要是 T<sub>1</sub> 相, 还有少量细小 δ'/β' 和 δ' 相, 因此获得了较高的强度, 但各向异性显著。

FTMT 通常是在固溶之后进行预拉伸, 目的是调控析出相的尺寸分布从而达到强化作用, 已成为铝锂合金目前主流的形变热处理工艺, 大幅提升铝锂合金的力学性能, 充分发挥了铝锂合金的比强度优势, 如图 4 所示<sup>[17-25]</sup>, 第二代铝锂合金比强度远优于 2024 铝合金, 基本与 7075 铝合金相当, 第三代铝锂合金比强度远优于 7075 铝合金, 与传统高强铝合金相比铝锂合金比强度优势明显。Walker 等<sup>[13]</sup> 研究了不完全固溶处理对 2195 铝锂合金力学性能及机械各向异性的影响。结果表明, 随炉升温至 507 °C 保温 30 min 的样品(完全固溶), 其抗拉强度远大于固溶 10 min 的样品, 这是由于不完全固溶导致后续进行冷变形时, T<sub>1</sub> 相的成核数量较少, 从而使其强度低于完全固溶样品的强度。Balducci 等<sup>[14]</sup> 研究了过时效对 2055 Al-Cu-Li-Ag 合金组织与拉伸性能的影响, 在 200 °C 下进行长期时效, θ' 和 T<sub>1</sub> 析出相均会发生不同程度的粗化, 并且其体积分数也大幅降低, 从而导致力学性能的降低。在 305 °C 下过时效 24 h, 可以观察到 T<sub>1</sub> 相的溶解, 从而促进了 θ' 和 Ω 相的形成并逐渐粗化。Rodgers 等<sup>[15]</sup> 研究了不同预拉伸量对 2195 铝锂合金性能的影响, 随着预变形量的增加, 促进 T<sub>1</sub> 相细小弥散析出, 其引起的位错强化贡献率高于沉淀强化贡献率, 抗拉强度可达 686 MPa。Xu 等<sup>[16]</sup> 研究了预拉伸对 2050 铝锂合金力学性能的影响, 预拉伸可提

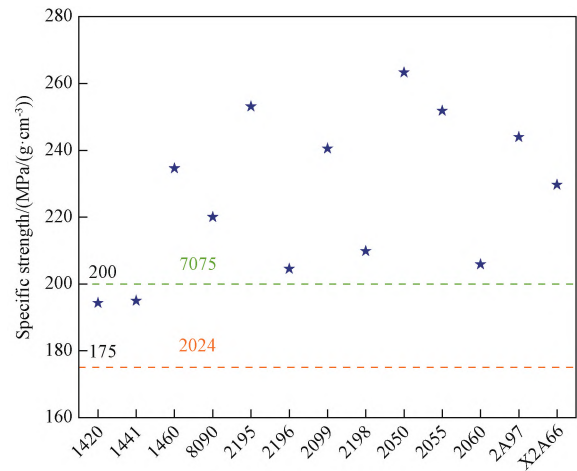


图 4 典型铝锂合金比强度<sup>[17-25]</sup>

Fig. 4 Specific strength of typical Al-Li alloys<sup>[17-25]</sup>

升铝锂合金时效动力学, 有效缩短峰时效响应时间, 其引起的高位错密度有效提升 T<sub>1</sub> 相形核率, 位错处非 Cu 原子的偏聚在时效早期抑制 GP 区的形成, 从而提供足够的 Cu 原子形成 T<sub>1</sub> 相, 铝锂合金抗拉强度最高可达 711 MPa。

本课题组研究了 Ag 元素含量对 2055 铝锂合金微观组织与力学性能的影响, 如图 5 所示。通过改变合金中 Ag 元素的含量, 促进合金时效前期 Mg-Ag 团簇的形成, 该团簇可作为异质形核点促进时效过程中 T<sub>1</sub> 相的析出, 显著增加合金 T6 态的力学性能。当引入 6% 的预拉伸变形后, 高密度位错一方面可作为形核位点促进 T<sub>1</sub> 相的析出, 另一方面也会阻碍 Mg-Ag 团簇的形成, 此时预变形的促进作用主导合金的时效析出行为, Ag 元素作用相对减弱, 从而导致 T8 状态下不同 Ag 含量的 2055 铝锂合金力学性能差异减小。

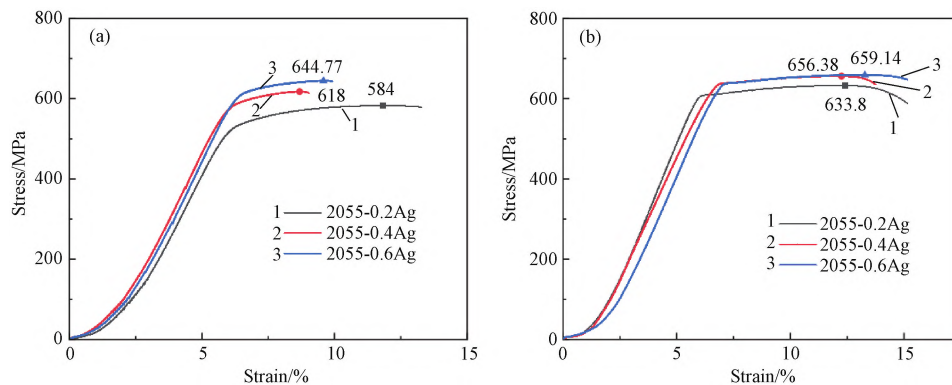


图 5 不同 Ag 含量的时效态 2055 铝锂合金应力-应变曲线 (a) T6 态; (b) T8 态

Fig. 5 Stress-strain curves of the aged 2055 Al-Li alloy with different Ag contents (a) T6; (b) T8

## 2 铸造铝锂合金开发

国内铝锂合金的研制基本以变形铝锂合金为主,铸造铝锂合金在十三五期间开始成为热点新课题,采用高强铸造铝锂合金代替常规的铸造铝合金可实现有效减重,铸造作为目前最有效、最经济性的短流程加工方法,在生产复杂零部件中具有得天独厚的优势,可满足兵器装备领域绝大多数形状复杂、薄壁的零部件的需求。铸造合金的强化手段有限,仅能通过微合金化和热处理工艺优化提升性能,因此铸造铝锂合金性能改善的关键在于成分优化并制定合理热处理工艺制度,充分发挥各微合金化元素作用,获得综合性能良好的铸造铝锂合金。

表 1 铸造铝锂合金成分及性能

Composition/mass%	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	A/%	Refs.
Al-2.5Li-1.1Cu-1.4Mg-0.2Zr	322	397	7.8	[26]
Al-2.5Li-1Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.2Sc	361	405	6.7	[27]
Al-1.4Li-2.8Cu-1.5Mg-0.11Zr-0.28Mn	/	430	8.9	[28]
Al-2Li-2Cu-0.53Mg-0.16Zr-0.22Sc	377	478	8.4	[29]
Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.2Zr-0.2Sc	408	481	6.0	[30]
Al-2.5Li-1.5Cu-1Zn-0.5Mg-0.16Zr	392	504	3.7	[31]
Al-2.5Li-1.5Cu-1Zn-0.5Mg-0.15Zr-0.21Sc	401	565	8.2	[32]

与变形合金不同的是,铸造合金时效初期几乎观察不到 GP 区,时效初期主要的析出相为  $\delta'$  相、 $\beta'$  ( $\text{Al}_3\text{Zr}$ ) 相、 $\theta'$  相和少量的  $T_1$  相,随着时效的进行  $T_1$  相分别以消耗  $\delta'$  相和  $\theta'$  相中的 Li 原子和 Cu 原子的方式析出和长大。在过时效状态下,随着时效时间延长, $\delta'$  相、 $S'$  相和  $T_1$  相粗化并伴随着无沉淀析出带的宽化,合金力学性能降低。同时添加 Mg 和 Cu 元素加速铝锂合金的时效响应,将峰时效时间提前,通过热处理诱导形成大量弥散而均匀分布的  $T_1$ 、 $S'$  等析出相,其密排面不平行于铝基体密排面,位错只能绕过 S 相并留下位错环,故均匀细小分布的 S 相可以有效分散共面滑移,减少引起局部平面滑移  $\delta'$  相的影响,还可降低 PFZ 区宽度,促进均匀形变,提高强度和塑性。

Mg 元素的添加将促使铸造铝锂合金的溶解度曲线上移,降低 Li 元素的固溶度,促进  $\delta'$  相的析出,增加  $\delta'$  相的体积分数,同时增加  $\delta'$  相与基体的错配度,有效提高合金的强度。本文作者所在单位研究了 Mg 含量对 Al-2Cu-2.5Li-0.1Sc-0.1Zr 合金铸态显微组织及力学性能的影响<sup>[33]</sup>,发现 Mg 含量对合金晶粒尺寸和共晶相析出有重要影响,随着 Mg 含量增加,晶粒尺寸逐渐减小,促进了合金中  $\text{Al}_2\text{MgLi}$  及  $\text{Al}_6\text{CuLi}_3$  相

的形成,晶界附近的针状共晶相也有所减少,提升了合金强度;但随着 Mg 含量进一步增加,晶界处  $\text{Al}_2\text{MgLi}$  相不断聚集粗化,易割裂基体,导致合金强度下降。图 6 为不同 Mg 含量固溶态铝锂合金的力学性能<sup>[34]</sup>,合金的强度随着 Mg 含量的增加呈现先上升后下降趋势,1 mass%Mg 可实现铸造铝锂合金强度与塑性良好匹配。

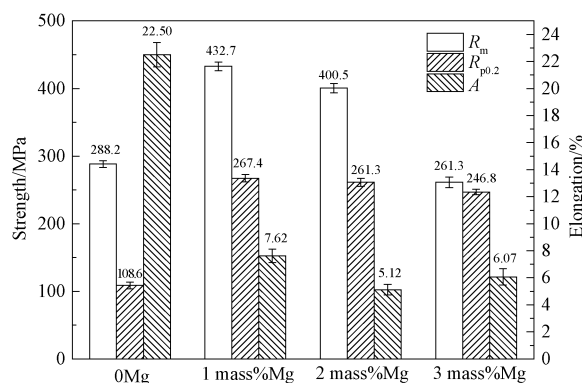


图 6 不同 Mg 含量固溶态 Al-Cu-Li-Mg-Sc-Zr 合金的拉伸性能<sup>[34]</sup>

Fig. 6 Tensile properties of the solution treated Al-Cu-Li-Mg-Sc-Zr alloys with different Mg contents<sup>[34]</sup>

Zn 元素同样可以影响铸造铝锂合金的时效析出

序列, 获得较好的强化效果, Zhang 等<sup>[31]</sup> 研究发现 Zn 元素的加入可以提升铸造铝锂的时效响应速率, Zn 原子在时效早期与 Mg 原子竞争与 Cu 原子结合形成  $T_1$  相的前驱体, 当 Zn 含量达到 1 mass% 时,  $T_1$  相的析出显著增多,  $S'$  相析出较少。同时, Zn 元素的加入可促进  $\delta'$  相析出, 抑制  $\delta'$ -PFZ 的加宽, 释放更多空位, 产生更多的  $S'$  和  $T_1$  相的形核位点, 在 175 °C 下时效 64 h 后获得最佳的力学性能。Zhang 等<sup>[26]</sup> 研究发现 Ni 元素在铸造铝锂合金中会形成  $Al_3CuNi$  颗粒, 这些含镍颗粒将成为富铜相的成核点, 减少了基体中固溶体 Cu 原子的数量, 抑制了  $\delta'$ -PFZ 的形成和

生长。

稀土元素可改变强化相的尺寸、形貌与分布状况, 减小 PFZ 宽度, Zhang 等<sup>[32]</sup> 研究了时效工艺和 Sc 元素对铸造铝锂合金析出相的影响, 随着时效温度的升高, 形成大量  $T_1$  相, 获得优异的屈服强度, 但伸长率降低; Sc 元素的加入可以细化晶粒尺寸, 获得宽度 10 nm 以下 PFZ, 使合金伸长率达到 8.2%, 150 °C 下时效 64 h 后形成  $Al_3(Sc, Zr, Li)$  复合颗粒和大量  $S'$  相 (如图 7 所示), 使合金抗拉强度达到 565 MPa, 获得综合力学性能优异的铸造铝锂合金。

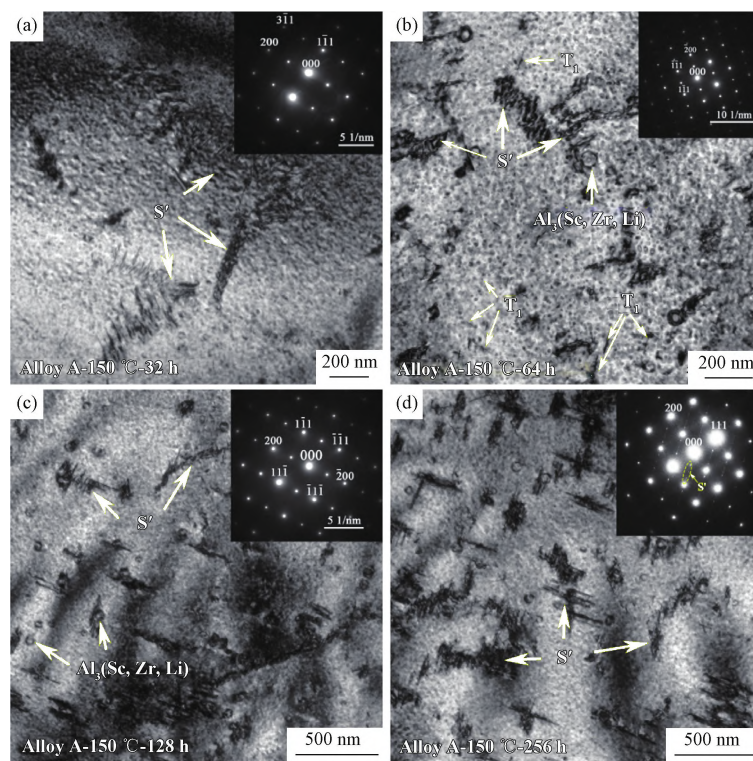


图 7 添加 0.2Sc 的 Al-Li-Cu 合金在不同 150 °C 时效不同时间的 TEM 照片<sup>[32]</sup>

(a) 150 °C × 32 h; (b) 150 °C × 64 h; (c) 150 °C × 128 h; (d) 150 °C × 256 h

Fig. 7 TEM micrographs of the Al-Li-Cu alloy with 0.2Sc addition aged at 150 °C for different time<sup>[32]</sup>

(a) 150 °C × 32 h; (b) 150 °C × 64 h; (c) 150 °C × 128 h; (d) 150 °C × 256 h

### 3 铝锂合金超塑性研究

超塑性成形是一种等材制造的整体成型工艺, 安全可靠, 可有效节省材料用量、降低生产成本、减轻结构重量, 在减重需求迫切的航空航天领域获得广泛应用。金属材料具有细晶组织 (晶粒尺寸 0.5 ~ 5 μm) 并在一定温度和应变速率下, 可实现超塑性成形。Li 元素的加入导致铝锂合金室温塑性差, 成形时易开裂、各向异性较传统铝合金严重, 常规工艺很难实现超塑性成形。通过一定的形变热处理工艺可

以使铝锂合金获得超细晶组织, 从而使其具备超塑性, 利用低温胀形、蠕变时效成形、超塑扩散连接等超塑性成形技术制备铝锂合金薄壁整体构件, 可有效减少零件数量, 避免连接失效, 提高构件整体刚度和可靠性, 作为发展航空航天领域的重要手段, 铝锂合金超塑性成形构件已经成功地应用于各种航天器和各类军用、民用飞机上<sup>[35]</sup>。

铝锂合金超塑性研究主要集中在晶粒细化工艺的开发、晶粒与空洞组织演变、变形条件优化、变形机

理等方面,开发了比较有代表性的如 1420、2195、2050、2A97 等第二代、第三代铝锂合金,均为采用过时效、强应变控轧和再结晶等手段获得超塑性,伸长率可达 200%~900%,如表 2 所示。超塑性板材主流研究和工业化过程中,普遍采用盐浴炉进行再结晶退火,具有较高的再结晶退火升温速率,可获得更为细小的再结晶晶粒,但盐浴炉污染严重,正逐渐被时代所淘汰,急需开发一种绿色无污染的再结晶退火装备及工艺。本文作者所在课题组研究了 1420 铝锂合金超塑性及其超速变形行为<sup>[40]</sup>,通过向 1420 铝锂合金中加入 Sc 元素,形成的  $\text{Al}_3\text{Sc}$  相和  $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$  相可以作为异质形核质点,显著细化合金晶粒尺寸,采用固溶、双级过时效、轧制、再结晶退火工艺,在空气炉

再结晶退火条件下制备了具有带状组织,平均晶粒为  $3.5 \mu\text{m}$  的超细晶铝锂合金板材,在温度为  $450 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ,应变速率为  $3 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  的条件下均表现良好的超塑性,其中在  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  条件下获得最大伸长率,为 1180%,如图 8 所示<sup>[41]</sup>。

表 2 典型超塑性铝锂合金牌号及性能对比

Table 2 Designation and performance of typical superplastic Al-Li alloys

Designation	Superplasticity	Deformation conditions	Refs.
1420	900%	$480 \text{ }^\circ\text{C}$ , $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	[36]
2195	630%	$490 \text{ }^\circ\text{C}$ , $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$	[37]
2050	470%	$490 \text{ }^\circ\text{C}$ , $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$	[38]
2060	211%	$500 \text{ }^\circ\text{C}$ , $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$	[39]
2A97	470%	$430 \text{ }^\circ\text{C}$ , $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	[40]

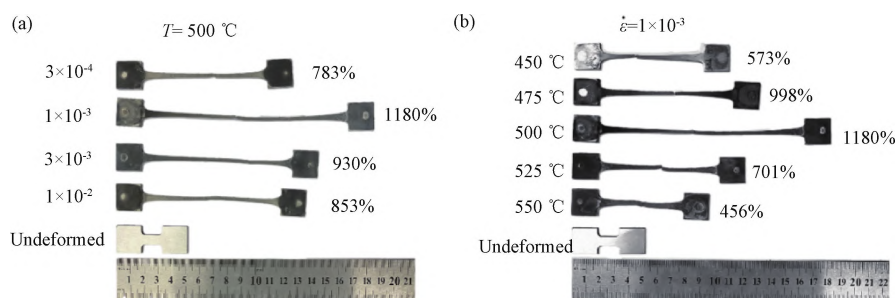


图 8 不同变形条件 1420 铝锂合金板材高温拉伸试样<sup>[41]</sup>

(a) 温度为  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  时不同应变速率; (b) 应变速率为  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  时不同温度

Fig. 8 High temperature tensile specimens of 1420 Al-Li alloy plate under different deformation conditions<sup>[41]</sup>

(a) different strain rates at  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (b) different temperatures at strain rate of  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

近年来铝锂合金超塑性变形机理方面研究较为火热,制备和产业化研究较少。Hiroshi 等<sup>[42]</sup>系统讨论了超塑性材料中的扩散和位错调节机制,这种调节机制导致了材料动态微观结构演变,表现为在近超塑性流动过程中的连续动态再结晶,晶界滑移产生的应变和晶界原子扩散之间的协同作用使合金获得超塑性变形能力。Liu 等<sup>[43-44]</sup>系统研究了 1420 合金和 2050 铝锂合金的超塑性变形行为和微观组织演变过程,通过定量计算晶界滑移和晶内位错滑移的贡献量,证明 1420 铝锂合金中晶界滑移是主要的变形机制,扩散蠕变和晶内位错滑移起到协调作用,在超塑性变形初期,带状晶粒发生动态再结晶转变为等轴晶粒,位错滑移抵消了动态再结晶引起的软化效应。而 2050 铝锂合金中扩散蠕变是主要变形机制,晶界滑移和晶内位错滑移起到协调作用。

#### 4 结语

目前我国在航空航天铝锂合金基础研究和工程

化研制应用中取得了一系列成果,具备了一定的铝锂合金铸锭生产能力,但具有自主知识产权的铝锂合金牌号少,产业化规模小,年产量不足 100 t,不能满足航空航天领域发展需求。在铝锂合金基础研究与工业生产及应用方面,我国与美、俄仍存在较大差距,高性能铝锂合金制备技术仍由美、俄等国家把控,国内铝锂合金产品质量及性能稳定性与国外存在较大差距,产品系列迟迟无法定型,国产大飞机 C919、支线客机 ARJ21 所用铝锂合金均为进口材料。受国外制约,军工单位无法直接批量采购国外铝锂合金,仅能通过商飞少量采购或采用国产铝锂合金试制,无法满足现有型号研制需求,急需攻克航空航天铝锂合金产业化制备技术,实现自主可控,建议重点围绕以下几个方向开展工作:

1) 合金材料熔铸先行,加强铝锂合金熔铸工艺改善和铸锭质量评价体系建立,从源头保障变形材性能和加工成品率;

2) 加快新一代的铝锂合金产业化进程,对相关

产品指标进行系统评估,提升产品质量稳定性,尽快形成自主知识产权牌号和相关标准;

3) 系统地研究形变热处理过程中不同工艺对铝锂合金微观组织与力学性能的影响,掌握不同牌号合金的形变热处理工艺及其强化机理,指导铝锂合金变形材的实际生产和应用;

4) 开发铝锂合金短流程制备新工艺,重点围绕铝锂合金精密成型和超塑性一体化成形技术,扩大铝锂合金应用;

5) 提升铝锂合金搅拌摩擦焊工艺成熟度,重点围绕复杂结构件焊接技术和高效焊接工艺开发,为铝锂合金构件连接与制造提供技术支撑。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] 王硕,张弛,王俊升. 铝锂合金纳米析出相结构与性能综述[J]. 航空制造技术,2021,64(9):68-76.  
WANG Shuo,ZHANG Chi,WANG Jun-sheng. Structures and properties of nano-precipitates in Al-Li alloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2021,64(9):68-76.
- [ 2 ] Prasad N E,Gokhale A,Wanhill R J H. Aluminum-Lithium Alloys: Processing, Properties, and Applications[M]. Oxford,UK: Butterworth-Heinemann,2014.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] Deschamps A,Decreus B,De Geuser F,et al. The influence of precipitation on plastic deformation of Al-Cu-Li alloys[J]. Acta Materialia,2013,61(11):4010-4021.
- [ 5 ] Ovri H,Jäggle E A,Stark A,et al. Microstructural influences on strengthening in a naturally aged and overaged Al-Cu-Li-Mg based alloy[J]. Materials Science and Engineering A,2015,637:162-169.
- [ 6 ] Nie J F,Muddle B C,Polmear I J. The effect of precipitate shape and orientation on dispersion strengthening in high strength aluminium alloys[J]. Materials Science Forum,1996,217-222:1257-1262.
- [ 7 ] Nie J F,Muddle B C. Microstructural design of high-strength aluminum alloys[J]. Journal of Phase Equilibria,1998,19(6):543-551.
- [ 8 ] 刘欣,王国庆,李曙光,等. 重型运载火箭关键制造技术发展展望[J]. 航天制造技术,2013(1):1-6.  
LIU Xin,WANG Guo-qing,LI Shu-guang,et al. Forecasts on crucial manufacturing technology development of heavy lift launch vehicle[J]. Aerospace Manufacturing Technology,2013(1):1-6.
- [ 9 ] 黄兰萍,郑子樵,李世晨,等. 铝锂合金的研究与应用[J]. 材料导报,2002(5):20-23.  
HUAN Lan-ping,ZHENG Zi-qiao,LI Shi-chen,et al. Study and application of aluminum-lithium alloy[J]. Materials Review,2002(5):20-23.
- [ 10 ] Munoz-Morris M A,Gutierrez-Urrutia I,Calderon N,et al. Refinement of precipitates and deformation substructure in an Al-Cu-Li alloy during heavy rolling at elevated temperatures[J]. Materials Science and Engineering A,2008,492(1-2):268-275.
- [ 11 ] Gairola S,Joshi A,Gangil B,et al. Correlation of tensile properties and fracture toughness with microstructural features for Al-Li 8090 alloy processed by cryorolling and post-rolled annealing[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals,2019,72(7):1743-1755.
- [ 12 ] Medjahed A,Moula H,Zegaoui A,et al. Influence of the rolling direction on the microstructure,mechanical,anisotropy and gamma rays shielding properties of an Al-Cu-Li-Mg-X alloy[J]. Materials Science and Engineering A,2018,732:129-137.
- [ 13 ] Walker W,Marloth R,Ye T H,et al. The effect of incomplete solution treatment on the tensile behavior and mechanical anisotropy of 2195 aluminum lithium alloy[J]. Diffusion Foundations,2019,22:109-117.
- [ 14 ] Balducci E,Ceschini L,Messieri S,et al. Effects of overaging on microstructure and tensile properties of the 2055 Al-Cu-Li-Ag alloy[J]. Materials Science and Engineering A,2017,707:221-231.
- [ 15 ] Rodgers B I,Prangnell P B. Quantification of the influence of increased pre-stretching on microstructure-strength relationships in the Al-Cu-Li alloy AA2195[J]. Acta Materialia,2016,108:55-67.

- [16] Xu X, Wu G, Zhang L, et al. Effects of heat treatment and pre-stretching on the mechanical properties and microstructure evolution of extruded 2050 Al-Cu-Li alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2022, 845:143236.
- [17] 刘丹阳,李劲风,郑子樵,等. Er 微合金化对 1441 铝锂合金微观组织和力学性能的影响[J]. *稀有金属*, 2017, 41(7): 725-732.  
LIU Dan-yang, LI Jin-feng, ZHENG Zi-qiao, et al. Microstructures and mechanical properties of 1441 Al-Li alloy with Er micro-alloying[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2017, 41(7):725-732.
- [18] Li J F, Ye Z H, Liu D Y, et al. Influence of pre-deformation on aging precipitation behavior of three Al-Cu-Li alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica(English Letters)*, 2017, 30(2):133-145.
- [19] Nouri S, Sahmani S, Hadavi M, et al. Mechanical properties improvement of Al-Li 8090 alloy by using the new proposed method of directional quenching[J]. *Metals and Materials International*, 2020, 26:1134-1143.
- [20] Chen X, Ma X, Xi H, et al. Effects of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of extruded 2196 Al-Cu-Li alloy[J]. *Materials & Design*, 2020, 192:108746.
- [21] Balducci E, Ceschini L, Messieri S, et al. Thermal stability of the lightweight 2099 Al-Cu-Li alloy: Tensile tests and microstructural investigations after overaging[J]. *Materials & Design*, 2017, 119:54-64.
- [22] Yang K, Bai Z H, Lu Y L, et al. Microstructural evolution and mechanical behaviors of Al-Cu-Li alloy processed by laser shock peening[J]. *Materials Characterization*, 2022, 191:112125.
- [23] Dong F, Huang S, Yi Y, et al. Effect of increased stretching deformation at cryogenic temperature on the precipitation behavior and mechanical properties of 2060 Al-Li alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2022, 834:142585.
- [24] 王燕,杜荣. 2A97-T84 铝锂合金型材形变热处理工艺技术研究[J]. *铝加工*, 2021, 46(6):49-52.  
WANG Yan, DU Rong. Research on deformation heat treatment technology of 2A97T84 Al-Li alloy[J]. *Aluminium Fabrication*, 2021, 46(6):49-52.
- [25] 都昌兵,熊纯,官瑞春,等. 预拉伸对 X2A66 铝锂合金时效析出行为以及力学性能的影响[J]. *航空材料学报*, 2020, 40(5): 29-37.  
DOU Chang-bing, XIONG Chun, GUAN Rui-chun, et al. Effect of pre-stretching on the precipitation behavior and mechanical properties of X2A66 aluminum alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2020, 40(5):29-37.
- [26] Zhang X, Wang H, Zou C, et al. The evolution of microstructure and mechanical properties at elevated temperature of cast Al-Li-Cu-Mg alloys with Ni addition[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(5):11069-11079.
- [27] Zhang X, Wang H, Yan B, et al. The effect of grain refinement and precipitation strengthening induced by Sc or Er alloying on the mechanical properties of cast Al-Li-Cu-Mg alloys at elevated temperatures[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2021, 822:141641.
- [28] Duan S W, Matsuda K, Wang T, et al. Microstructures and mechanical properties of as cast Al-Cu-Li alloy during heat treatment procedure[J]. *Rare Metals*, 2021, 40(7):1897-1906.
- [29] Zhang X, Wu G, Zhang L, et al. Effects of Mg and Sc additions on the microstructure, mechanical properties, and thermal stability of a cast Al-2Li-2Cu-0.2Zr alloy after thermal exposure[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 788:367-382.
- [30] Wu G, Zhang X, Zhang L, et al. An insight into the precipitate evolution and mechanical properties of a novel high-performance cast Al-Li-Cu-Mg-X alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 875:159996.
- [31] Zhang J S, Wu G H, Zhang L, et al. Effect of Zn on precipitation evolution and mechanical properties of a high strength cast Al-Li-Cu alloy[J]. *Materials Characterization*, 2020, 160:110089.
- [32] Zhang J S, Wu G H, Zhang L, et al. Addressing the strength-ductility trade-off in a cast Al-Li-Cu alloy-synergistic effect of Sc-alloying and optimized artificial ageing scheme[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2022, 96:212-225.
- [33] 吴国华,孙江伟,张亮,等. 铝锂合金材料研究应用现状与展望[J]. *有色金属科学与工程*, 2019, 10(2):31-46.  
WU Guo-hua, SUN Jiang-wei, ZHANG Liang, et al. Current status and prospects of research and application of aluminum-lithium alloy[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2019, 10(2):31-46.
- [34] 刘志鹏,马凯杰,廖荣跃,等. Mg 含量及固溶处理对 Al-Cu-Li-Sc-Zr 合金组织及性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*,

- 2022,42 (6):744-748.
- LIU Zhi-peng, MA Kai-jie, LIAO Rong-yue, et al. Effects of Mg content and solution treatment on microstructure and properties of cast Al-Cu-Li-Sc-Zr alloy[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2022, 42(6):744-748.
- [35] 李红萍, 叶凌英, 邓运来, 等. 航空铝锂合金研究进展[J]. *中国材料进展*, 2016, 35(11):856-862.
- LI Hong-ping, YE Ling-ying, DENG Yun-lai, et al. Progress of aircraft Al-Li alloys [J]. *Materials China*, 2016, 35(11):856-862.
- [36] 叶凌英, 杨栋, 李红萍, 等. 5A90 铝锂合金超塑性变形机理的定量研究[J]. *材料工程*, 2019, 47(11):163-170.
- YE Ling-ying, YANG Dong, LI Hong-ping, et al. Quantitative study of superplastic deformation mechanism of 5A90 Al-Li alloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(11):163-170.
- [37] Du Y X, Zhang X M, Ye L Y, et al. Superplastic behavior of Al-Cu-Li based alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, 16:1379-1382.
- [38] Li H, Liu X, Sun Q, et al. Superplastic deformation mechanisms in fine-grained 2050 Al-Cu-Li alloys[J]. *Materials*, 2020, 13(12):2705.
- [39] 于以标, 陈乐平, 徐勇, 等. 分步变形条件对 2060 铝锂合金超塑性的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2022, 42(3):366-370.
- YU Yi-biao, CHEN Le-ping, XU Yong, et al. Effects of multi-step deformation conditions on superplasticity of 2060 Al-Li alloy[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2022, 42(3):366-370.
- [40] 毕静, 张艳苓, 张宁, 等. 2A97 铝锂合金超塑变形规律及其本构方程[J]. *精密成形工程*, 2015, 7(2):41-45.
- BI Jing, ZHANG Yan-ling, ZHANG Ning, et al. Superplastic deformation law and constitutive equation of 2A97 Al-Li alloy[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2015, 7(2):41-45.
- [41] Zhang C Z, Xiao Y, Ma K J, et al. Superplastic flow and deformation mechanism of the rolled Al-Mg-Li-Sc-Zr alloy with banded microstructure[J]. *Metals*, 2021, 11(3):404.
- [42] Hiroshi M, Eiichi S. Diffusional and dislocation accommodation mechanisms in superplastic materials[J]. *Acta Materialia*, 2020, 197:235-252.
- [43] Liu X D, Ye L Y, Tang J G, et al. Superplastic deformation mechanisms of an Al-Mg-Li alloy with banded microstructures[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2021, 805:140545.
- [44] Liu X D, Ye L Y, Tang J G, et al. Superplastic deformation mechanisms of a fine-grained Al-Cu-Li alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2022, 848:143403.