

国内铝锂合金基础研究及应用技术开发

李劲风¹ 陈永来² 马云龙³ 张绪虎²

(1 中南大学材料科学与工程学院, 长沙 410083)

(2 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

(3 宇航系统工程研究所, 北京 100076)

文 摘 总结了国内在铝锂合金主合金元素 Cu、Li 以及微合金元素 Mg、Ag、Zn、稀土的(微)合金化效果及作用机理方面的研究结果。在主合金元素的研究方面,重点阐述了铝锂合金强度随 Cu+Li 总原子分数及 Cu/(Cu+Li) 原子分数比例增加而提高,但晶间腐蚀(IGC)抗力则随 Cu/Li 比增加而逐渐降低的规律及相关机理。在微合金化元素研究方面,主要阐述了 Mg+X(X=Ag/Zn) 添加促进 T₁(Al₂CuLi) 相形核并提高铝锂合金力学性能的机理,其强化效果的规律表现为: Mg+Ag+Zn>Mg+Ag>Mg+Zn>Mg, 同时还阐明了添加微量 Zn 元素提高铝锂合金 IGC 抗力,而添加微量 Ag 则降低 IGC 抗力的现象及其机理;另外,还总结了稀土(RE)元素分别在高 Cu/Li 比铝锂合金(以 T1 相为主强化相)及低 Cu/Li 比铝锂合金[以 δ'(Al₃Li)相为主强化相]中的不利影响及有利影响的作用机理。除此之外,简述了国内航天用 2195 铝锂合金旋压、摩擦搅拌焊、氩弧焊、化铣等应用技术的开发情况。

关键词 铝锂合金,合金化,组织,性能,应用技术

中图分类号: TG113

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.04.005

Basic Research and Application Technology Development of Al-Li Alloy in China

LI Jinfeng¹ CHEN Yonglai² MA Yunlong³ ZHANG Xuhu²

(1 School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

(3 Beijing Institute of Aeronautical Systems Engineering, Beijing 100076)

Abstract The basic research on the correlation between composition, microstructure and properties of Al-Li alloy is reviewed, including the alloying effect and mechanism of main alloying elements Cu and Li, and micro-alloying elements of Mg, Ag, Zn and rare earth (RE). In the research of main alloying elements, it is described emphatically that the strength is enhanced with Cu+Li total atomic fraction and Cu/(Cu+Li) atomic fraction ratio, but the IGC resistance is deteriorated with Cu/Li ratio, the corresponding mechanism is explained. In the research of micro-alloying elements, it is expounded that the small addition of Mg+X (X=Ag/Zn) increases T₁ (Al₂CuLi) precipitation rates and improves the strength, and the effect displays as Mg+Ag+Zn>Mg+Ag>Mg+Zn>Mg. Meanwhile, it is described that Zn addition increases IGC resistance but Ag addition decreases IGC resistance. Furthermore, the adverse and beneficial effects and related mechanism of RE elements in Al-Li alloy with higher Cu/Li ratio and low Cu/Li ratio are summarized, respectively. In addition, the application technology development of spinning, friction stir welding (FSW), argon arc welding, chemical milling of Al-Li alloy is briefly described.

Key words Al-Li alloy, Alloying, Structure, Property, Application technology

0 引言

铝锂合金是指在铝及铝合金中添加 Li 而形成的一类铝合金。在铝合金中每添加 1.0% 的 Li, 可使铝

合金密度降低 3%, 强度提高 6%。新型铝锂合金具有低密度、高弹性模量、高比强度和高比模量的优点, 同时还兼具低疲劳裂纹扩展速率、较好的高温及

收稿日期: 2021-04-27

第一作者简介: 李劲风, 1971 年出生, 博士, 教授, 主要从事铝锂合金成分设计、组织与性能调控研究工作。E-mail: lijinfeng@csu.edu.cn

低温性能等特性,是理想的航空航天材料^[1]。国际上十分重视新型铝锂合金的研发,国内于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,进入21世纪后开始进行铝锂合金的自主开发。由于航天和航空的需求牵引,2010年以来,国内掀起了铝锂合金的研究热潮。

铝锂合金主要包括 Al-Mg-Li 及 Al-Cu-Li (或 Al-Li-Cu) 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; 欧美和中国大部分为 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。另外, 从铝锂合金发展而言, 目前广泛认为已发展了三代铝锂合金, 正在进行第四代铝锂合金的开发。不同代际铝锂合金成分特征如表1所示。

表1 不同代际铝锂合金成分主要特征
Tab. 1 Composition characteristics of Al-Li alloys in different generations

| 代 | Cu 含量/% | Li 含量/% | 微合金元素 | 国内研究的代表性合金 |
|---|---------|---------|------------------------|------------------------------|
| 二 | <2.5 | >2.0 | Zr+(Mg) | 2090, 8090, 2091 |
| 三 | >2.5 | <2.0 | Zr+(Mn)+(Mg)+(Ag)+(Zn) | 2195, 2297, 2099, 2050, 2A97 |
| 四 | >3.0 | <1.5 | Zr+Mn+Mg+(Ag)+(Zn) | 2A96(2A55) |

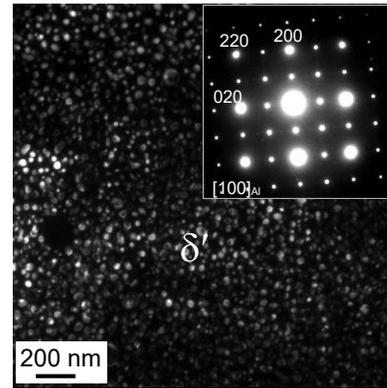
国内一直坚持进行铝锂合金研究的单位主要包括中南大学、航天材料及工艺研究所、北京航空材料研究院及西南铝业(集团)有限责任公司。目前还有一些科研院所、高校和企业也开始陆续开展部分研究和尝试性生产。为开发新型高性能铝锂合金并有效应用, 必须进行相关的基础研究和应用技术研究。而(微)合金化、组织与性能相关性的基础研究是开发新型高性能铝锂合金的基础; 同时, 针对焊接、旋压、化铣等方面的应用技术研究则是实现高性能铝锂合金实际应用的关键环节。基于此, 本文综述国内铝锂合金基础研究和应用技术开发, 拟为铝锂合金开发和应用提供参考。

1 铝锂合金成分、组织与性能的相关性

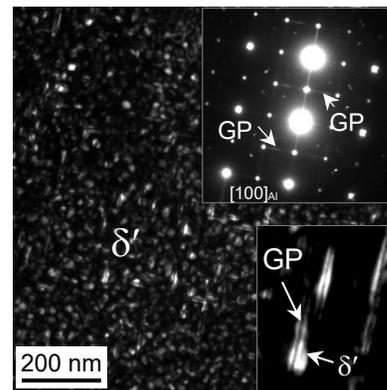
1.1 Cu、Li 含量对铝锂合金微观组织和性能的影响

国内特别是中南大学研究了接近全 Cu、Li 成分范围内的铝锂合金, 系统阐明了铝锂合金不同 Cu、Li 含量与相组成及力学性能的相关性。图1所示为不同 Cu、Li 含量铝锂合金选区衍射(SAED)谱及 TEM 暗场像(DF)照片。随 Cu 含量由 2.0% 以下逐渐增加至 4.0%, Li 含量由 2.5% 逐渐降低至 1.0%, 铝锂合金主要时效强化相组成分别为: δ' 相 (Al_3Li)、 $\delta'+\text{T}_1$ (Al_2CuLi)、 $\text{T}_1+\theta'$ (Al_2Cu), 其组成与合金中 Cu 和 Li 质量比例(Cu/Li 比)密切相关, 高 Cu/Li 比有利于增加 T_1

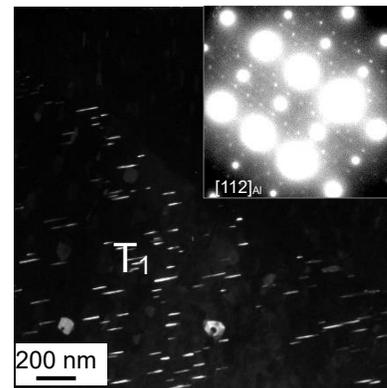
相和 θ' 相比比例, 而低 Cu/Li 比则导致较高的 δ' 相比比例^[2-5]。



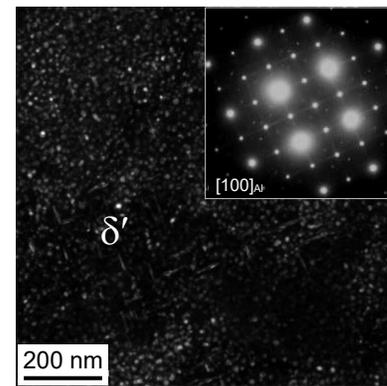
(a) 1.08Cu-2.43Li, δ' 相, $[100]_{\text{Al}}$ SAED 谱^[2]



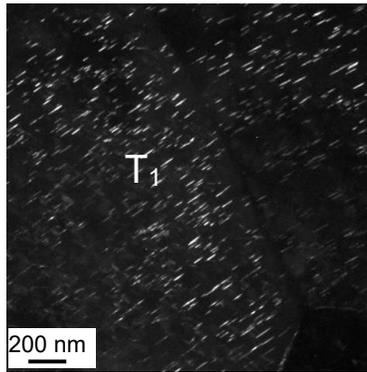
(b) 3.12Cu-2.14Li, δ' 相, $[100]_{\text{Al}}$ SAED 谱^[3]



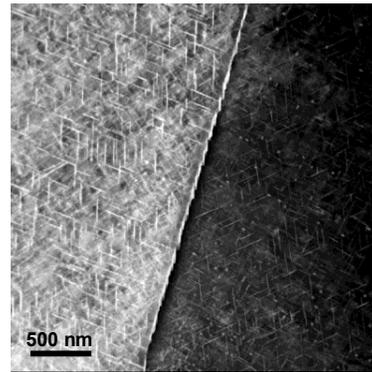
(c) 3.12Cu-2.14Li, T_1 相, $[112]_{\text{Al}}$ SAED 谱^[3]



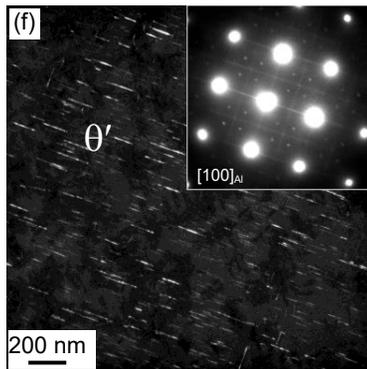
(d) 2.6Cu-1.75Li, δ' 相, $[100]_{\text{Al}}$ SAED 谱^[4]



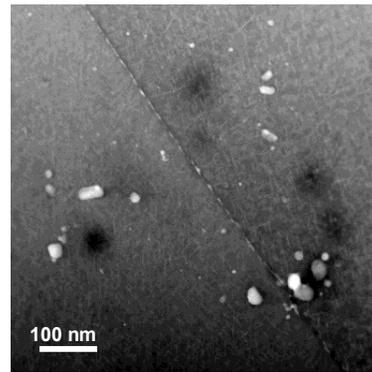
(e) 2.6Cu-1.75Li, T_1 相, $[112]_{Al}$ SAED谱^[4]



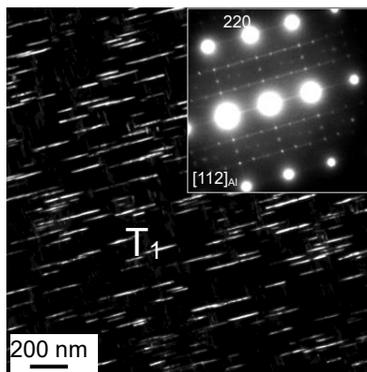
(a) 3.82Cu-0.91Li



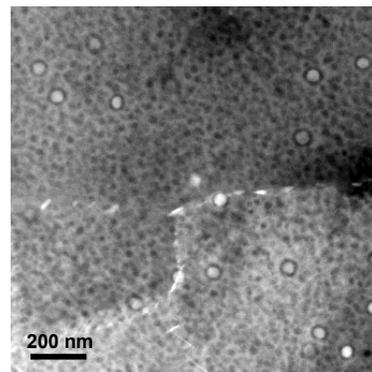
(f) 3.97Cu-0.81Li, θ' 相, $[100]_{Al}$ SAED谱



(b) 2.78Cu-1.68Li



(g) 3.97Cu-0.81Li, T_1 相, $[112]_{Al}$ SAED谱



(c) 1.08Cu-2.43

图1 不同Cu、Li含量铝锂合金SAED谱及TEM-DF照片
Fig. 1 SAED patterns and TEM-DF images of Al-Li alloys with different Cu and Li concentrations

Cu/Li比差异还导致铝锂合金晶界析出相种类和分布的不同。高Cu/Li比时晶界可析出较密集的 T_1 相[图2(a)]; Cu/Li比降低,晶界析出含Cu的 T_1 相减少[图2(b)]且形成粗大不连续 δ 相[2(c)]^[5-6]。

Cu、Li含量的差异通过改变时效析出相的组成进一步影响其力学性能,然而其强度并不完全随Li含量增加而顺序提高。铝锂合金中 T_1 相强化效果最优, θ' 相次之, δ' 相强化效果最弱。基于这一强化效果差异,结合Cu、Li含量对析出相类型和比例的影响分析,李劲风、马云龙等以Cu、Li总原子分数及Cu/

图2 不同Cu、Li含量Al-xCu-yLi-0.4Mg-0.35Mn-0.12Zr合金T6峰时效时晶界区域扫描透射电子显微镜(STEM)照片^[6]

Fig. 2 STEM images of the grain boundary area in T6 peak-aged Al-xCu-yLi-0.4Mg-0.35Mn-0.12Zr alloys with different Cu and Li concentrations^[6]

(Cu+Li)(或Cu/Li)原子分数比为自变量,系统分析了Cu、Li含量对Al-Cu-Li系铝锂合金强度的影响规律^[7-9],其中2195铝锂合金成分范围内Cu+Li总原子分数及Cu/(Cu+Li)原子分数比例与强度关系如图3所示[图中数字分别表示合金编号及其对应的Cu/(Cu+Li)原子分数比例]^[9]。随Cu+Li总原子分数增加,铝锂合金强度有提高的趋势。而在Cu+Li总原子分数相同(近)时,随Cu/(Cu+Li)原子分数比例增加,强度有增加的趋势。马云龙基于上述分析,进一步

以Cu+Li总原子分数及Cu/(Cu+Li)原子分数比例为因变量,建立了强度与Cu、Li含量的数学关系,并进而建立了2195铝锂合金的成分控制要求^[8]。

国内学者还详细研究了铝锂合金与析出相相关的腐蚀电化学机理,揭示铝锂合金中含Cu、Li元素的

T₁及T₂相(Al₆CuLi₃)在腐蚀过程中的电化学极性转换机理,阐明了T₁及T₂相导致铝锂合金腐蚀敏感性的差异^[10]。结合Cu/Li比对晶界析出相类型及分布的影响,阐明了随Cu/Li比降低,其晶间腐蚀(IGC)抗力逐渐提高的规律及其机理(图4)^[6]。

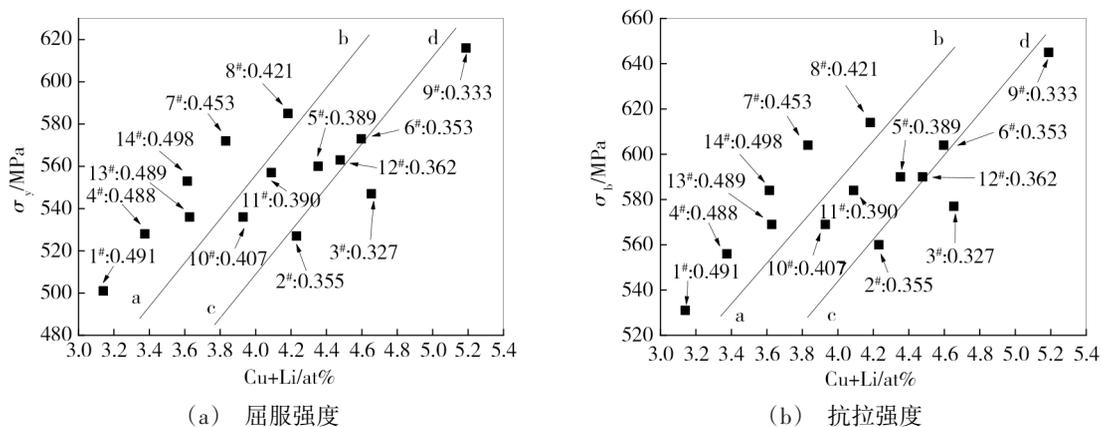
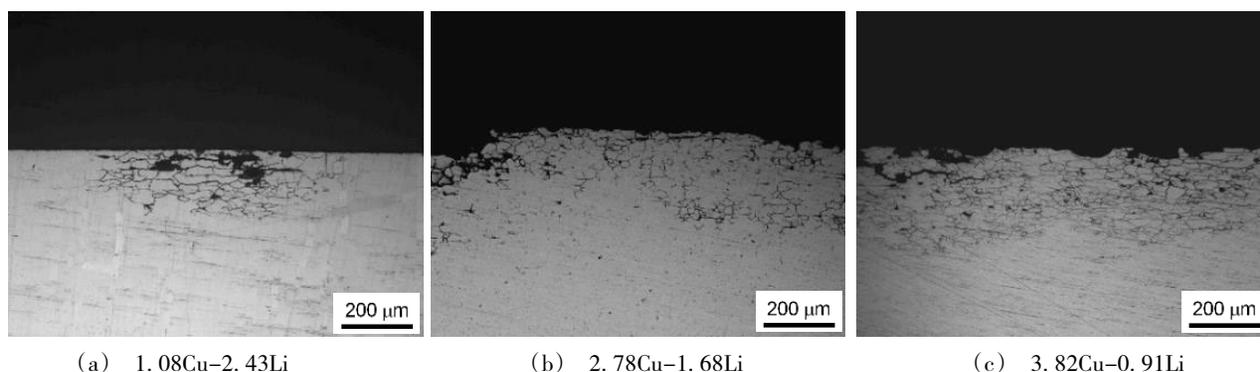


图3 2195铝锂合金强度与Cu+Li总原子分数及Cu/(Cu+Li)原子分数比例的关系^[8]

Fig. 3 Correlation of strength with total atomic fraction of Cu+Li and Cu/(Cu+Li) ratio in 2195 Al-Li alloy^[8]



(a) 1.08Cu-2.43Li (b) 2.78Cu-1.68Li (c) 3.82Cu-0.91Li

图4 Al-xCu-yLi-0.4Mg-0.35Mn-0.12Zr合金时效后晶间腐蚀侧面形貌^[6]

Fig. 4 Typical sectional IGC morphologies of Al-xCu-yLi-0.4Mg-0.35Mn-0.12Zr with different Cu and Li concentrations.

铝锂合金材料应用时,厚度规格是其重要考量指标之一,而厚度规格与其淬透性密切相关,淬透性则决定于铝锂合金的成分。由于航天及航空对厚截面铝锂合金的需求,国内最近开始重视铝锂合金淬透性研究。如采用薄板叠层端淬结合后续时效态强度测试的方法,定量比较研究后阐明了2050铝锂合金淬透性远高于2195铝锂合金^[11],同时还详细研究了2060铝锂合金淬透性及淬火敏感性^[12]。笔者课题组还在进行不同Cu含量铝锂合金淬透性研究,结果表明随Cu含量增加,铝锂合金淬透性降低。

1.2 微合金化元素对铝锂合金微观组织和性能的影响

1.2.1 Mg、Ag、Zn微合金化

Mg、Ag、Zn是第三代铝锂合金重要的微合金化元素,通常以Mg+Ag或Mg+Zn形式进行复合微合金

化。中南大学于20世纪90年代率先开展铝锂合金中Mg+Ag复合微合金化研究^[13],后续系列Mg、Ag、Zn的复合微合金化研究结果表明,Mg、Mg+Ag、Mg+Zn、Mg+Ag+Zn添加显著影响铝锂合金强化相的时效析出,特别是有利于促进T₆态时效时T₁相的形核,增加T₁相密度,加速时效响应速度,进而提高铝锂合金的力学性能(表2)^[14-17]。综合而言,Mg+X(X=无、Ag或/和Zn)微合金强化效果呈现如下规律:Mg+Ag+Zn>Mg+Ag>Mg+Zn>Mg。

关于Mg+Ag复合微合金化促进T₁相形核析出,郑子樵等提出了如下的“桥梁”作用机理。由于Mg、Ag原子间的强相互作用,在淬火及时效早期,合金中形成了Mg-Ag原子团簇;在随后的时效过程中,Mg、Ag原子与Cu、Li原子的相互作用促使Cu、Li原子扩散到团簇周围,促进T₁相形核,即Mg、Ag原子在时效

前期将作为“桥梁”促进T₁相形核^[13]。3DAP检测[图5(a)]发现2050铝锂合金的T₁相中存在Mg、Ag原子也佐证了这一作用机理^[18]。

关于Mg+Zn微合金化作用机理,一般认为与Mg+Ag类似,作者课题组也发现在含Mg、Zn元素的2099铝锂合金T₁相内部发现Mg、Zn的同时富集[图5

表2 Mg、Ag、Zn微合金化Al-Cu-Li-X铝锂合金T6态(175 °C)峰时效时拉伸性能

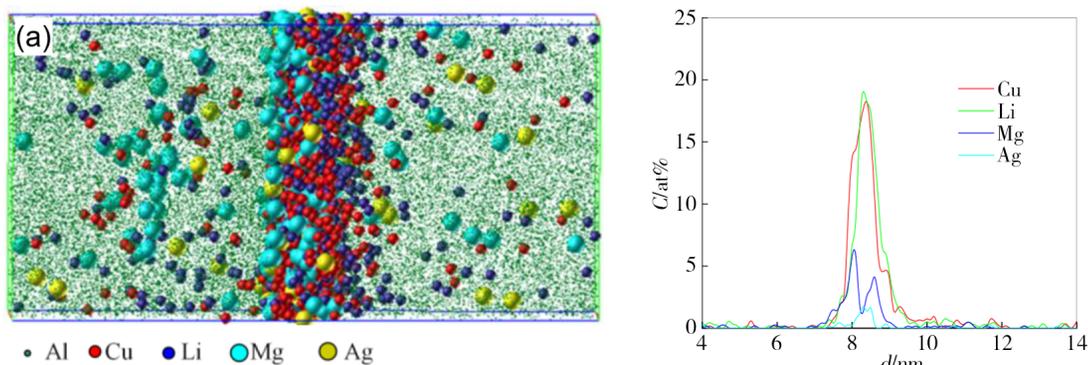
Tab. 2 Tensile properties of Al-Cu-Li-X alloy microalloyed with Mg, Ag and Zn after T6 peak-aging at 175 °C

| 微合金化元素 | Al-3.5Cu-1.0Li-X X薄板 ^[18] | | | Al-2.6Cu-1.7Li-X 挤压棒 ^[4] | | | Al-3.7Cu-1.2Li-X 薄板 ^[17] | | |
|----------|--------------------------------------|----------------|----------|-------------------------------------|----------------|----------|-------------------------------------|----------------|----------|
| | σ_b | $\sigma_{0.2}$ | δ | σ_b | $\sigma_{0.2}$ | δ | σ_b | $\sigma_{0.2}$ | δ |
| | MPa | MPa | % | MPa | MPa | % | MPa | MPa | % |
| Mg-free | 335 | 248 | 14 | | | | | | |
| Mg | 444 | 410 | 9 | 539 | 490 | 8 | | | |
| Mg+Ag | 522 | 506 | 8 | | | | 582.2 | 527.5 | 7.5 |
| Mg+Zn | | | | 559 | 499 | 7 | 553.8 | 480.7 | 8.8 |
| Mg+Ag+Zn | | | | | | | 613.1 | 558.1 | 6.3 |

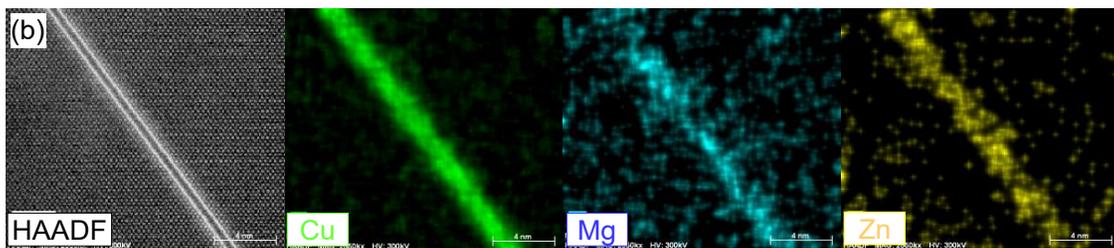
(b)]。然而,也有研究认为Zn原子进入T₁相,占据T₁相中Cu原子位置,即Zn元素取代T₁相中Cu元素位置^[19]。关于Mg、Zn复合微合金化的作用机理还需进一步加强研究。

国内比较研究了Ag、Zn微合金化对铝锂合金腐蚀行为的影响。铝锂合金中添加的Zn元素可进入晶界含Cu、Li析出相(晶界T₁相及晶界其他含Cu相),代替其部分Cu元素[图6(a)],降低析出相中不活泼元素Cu的含量,在腐蚀过程中减弱因电化学极性转换后促进边缘铝基体阳极溶解的效果,进而提高其耐蚀性能^[5,20-22]。Ag元素同样可进入晶界含Cu、Li析出相[图6(b)]^[22-23],然而由于Ag元素电化学活性低于Cu元素,反而可能加剧因电化学极性转换后促进其边缘铝基体阳极溶解的效果,降低其耐蚀性能。

另外,国内研究还表明添加Mg导致铝锂合金明显的自然时效响应^[24-25]。同时,需要特别注意的是,Mg含量过高时将促进人工时效时S'相(Al₂CuMg)析出,但阻碍T₁相析出,进而导致其强度降低^[26]。



(a) 含Mg、Ag的2050铝锂合金T₁相3DAP元素分布图及成分分布^[18]



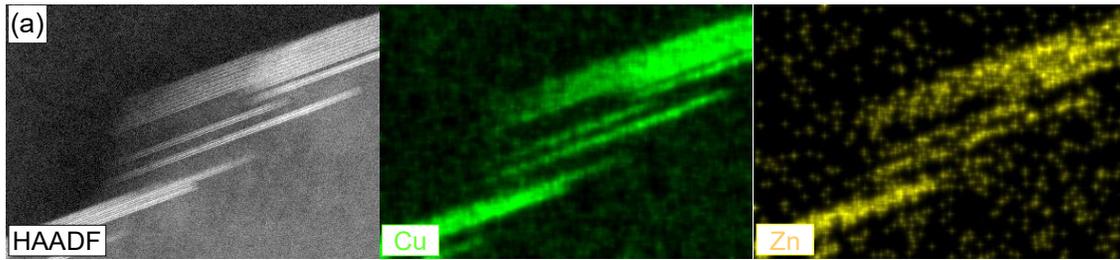
(b) 含Mg、Zn的2099铝锂合金HAADF照片及元素分布照片

图5 不同微合金化Al-Cu-Li合金T₁相中元素分布

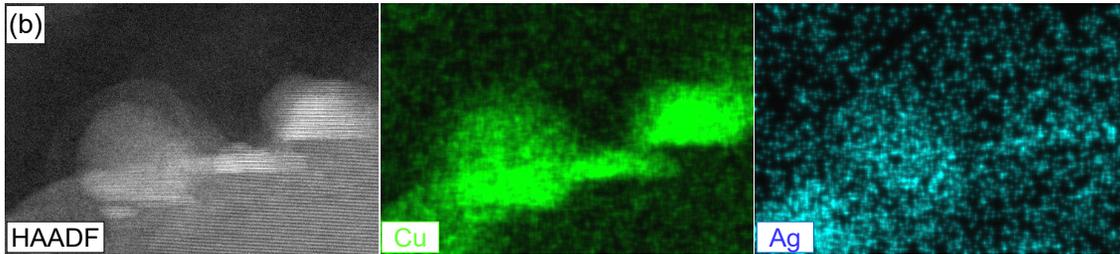
Fig. 5 Element distribution through T₁ precipitates in Al-Cu-Li alloy with different microalloying elements

基于上述Cu、Li含量及Mg、Ag、Zn微合金化元素作用效果及机理,国内形成了(超)高强铝锂合金、耐腐蚀铝锂合金的设计思路。“十一五”和“十二五”期间,中南大学、北京航空材料研究院、航天材料及工艺研究所及西南铝业(集团)有限责任公司联合开发了新型高强

高韧2A97铝锂合金;“十三五”期间由中南大学、航天材料及工艺研究所及西南铝业(集团)有限责任公司联合开发了超高强铝锂合金(2A96,后以2A55铝锂合金备案)^[27]。目前,中南大学正在进一步开发强度650 MPa甚至700 MPa的超强铝锂合金。



(a) 含 Zn 的铝锂合金



(b) 含 Ag 的铝锂合金

图6 HAADF-STEM照片及晶界析出相元素面扫描照片

Fig. 6 HAADF-STEM images and scanning element analysis mapping of grain boundary precipitates

1.2.2 稀土微合金化

稀土(RE)元素在Al-Mg系及Al-Zn-Mg系铝合金中有细化晶粒、阻碍再结晶、提高韧性及强度的效果。然而国内研究发现Sc、Ce、Er等稀土元素在不同Al-Cu-Li系铝锂合金中具有不同的作用效果,既可能提高铝锂合金强度,但也可能导致其强度降低,如表3所示。

微观组织分析表明,在Cu>3.0%、Li<1.5%的Al-Cu-Li系铝锂合金中,添加微量Sc、Ce、Er等RE元素后,RE元素与Cu元素结合,在凝固及退火过程中

即分别形成难溶 Al_8Cu_4Sc 、 Al_8Cu_4Ce 及 Al_8Cu_4Er 等第二相,导致固溶基体中Cu含量降低,后续时效时含Cu析出相 T_1 相及 θ' 相分数降低,强化效果降低。同时,不能有效地形成 Al_3Sc [或 $Al_3(Sc, Zr)$]等弥散粒子,减弱其细化晶粒、阻碍再结晶的效果^[30]。在低Cu/Li的合金中,强化相以 δ' 相为主, T_1 相比比例大幅度下降;同时能有效地形成 $Al_3(Sc, Zr)$ 等弥散粒子,发挥阻碍再结晶的效果。因而在低Cu/Li比铝锂合金中微量RE元素具有有效阻碍再结晶、提高强度的作用。

表3 微量稀土对Al-Cu-Li系铝锂合金强度的影响^[28-29]

Tab. 3 Influence of small addition of RE elements on Al-Cu-Li alloy strength^[28-29]

| 铝锂合金 | 合金成分/%(w) | | | | | | | | 强度变化 ¹⁾ |
|----------------------------|-----------|------|-----|------|------|------|------|---------|--------------------|
| | Cu | Li | Mn | Mg | Ag | Zn | Zr | RE | |
| 2099+Sc | 2.6 | 1.6 | 0.3 | 0.3 | - | 0.7 | 0.1 | 0.1Sc | 提高 |
| 1460+Sc | 3.0 | 2.0 | - | - | - | - | 0.1 | 0.11Sc | 提高 |
| | 3.0 | 2.0 | - | - | - | - | 0.1 | 0.22Sc | 降低 |
| 1469+Sc | 4.3 | 1.0 | - | 0.3 | 0.4 | - | 0.12 | 0.063Sc | 降低 |
| Al-Cu-Li+Sc | 3.52 | 1.5 | - | - | - | - | 0.12 | 0.11Sc | 提高 |
| | 3.51 | 1.51 | - | - | - | - | 0.12 | 0.15Sc | 无差异 |
| | 3.50 | 1.52 | - | - | - | - | 0.12 | 0.24Sc | 降低 |
| Al-Mg-Cu-Li+Sc | 1.5 | 1.0 | - | 4.0 | - | - | 0.12 | 0.2Sc | 提高 |
| Al-Cu-Li-Mg-Ag-Zr+Ce | 5.87 | 1.31 | - | 0.43 | 0.41 | - | 0.13 | 0.2Ce | 提高 |
| Al-Cu-Li-Mg-Zn-Mn-Zr+Sc | 3.36 | 1.19 | 0.3 | 0.4 | - | 0.4 | 0.1 | 0.082Sc | 降低 |
| Al-Cu-Li-Mg-Ag-Zn-Zr+Ce | 4.24 | 1.26 | - | 0.4 | 0.4 | 0.45 | 0.12 | 0.11Ce | 降低 |
| Al-Cu-Li-Mg-Ag-Zn-Mn-Zr+Er | 3.56 | 1.19 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.45 | 0.1 | 0.2Er | 降低 |

注:1)与不含稀土的铝锂合金比较。

另外,余鑫祥等^[31-32]研究也表明,当铝锂合金中Cu含量高于4.5%甚至接近固溶度极限时,微量Ce的添加可能细化弥散相粒子尺寸,仍然可能导致时效后强度提高。还有一个可能的原因是固溶处理时如此高浓度的Cu元素不能完全固溶至基体,即使添加Ce形成 Al_8Cu_4Ce 难溶相粒子,也不会降低固溶基体中的Cu含量。同时,Ce添加还能减小Cu、Li原子扩散速度,提高 T_1 相的热稳定性,相应地提高铝锂合金的耐热性。

1.2.3 Zr、Mn微合金化

Zr和Mn是铝锂合金中最重要的微合金化元素,所有第二、第三代铝锂合金中均添加微量Zr元素,而许多第三代铝锂合金还进一步添加微量Mn元素。添加Zr元素后,凝固时形成的 Al_3Zr 初生相粒子可作为凝固形核点,提高形核密度,细化铸态晶粒组织。退火过程中也可能形成共格 Al_3Zr 弥散相粒子,有效阻碍晶界迁移,细化再结晶晶粒组织。在Al-Cu-Li系铝锂合金中添加Mn可形成 $Al_{20}Cu_2Mn_3$ 弥散相粒子。

国内关于铝锂合金Zr、Mn微合金化研究较少。少量研究表明,添加少量Mn形成含Mn弥散相粒子可促进再结晶,降低铝锂合金的各向异性^[33]。至于微量Mn对铝锂合金强度的影响,有研究认为,添加

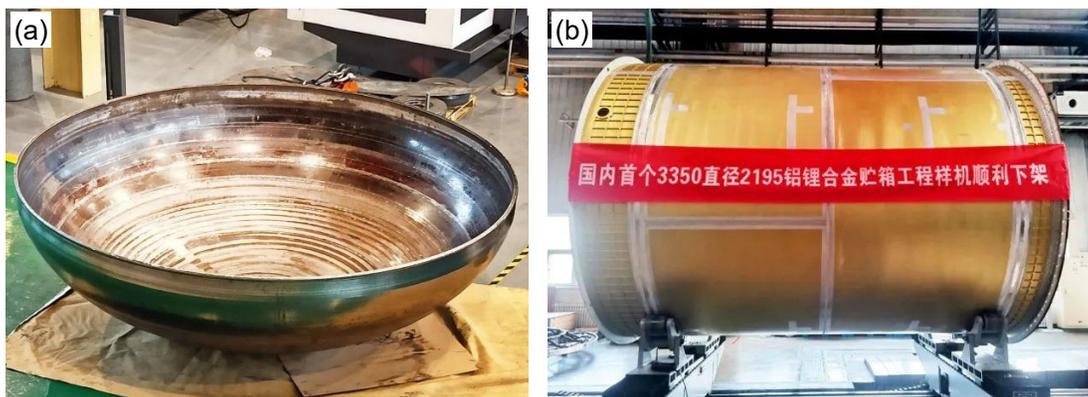
微量Mn形成弥散相粒子,同时使难溶相更加分散、细小,可提高铝锂合金强度^[34];也有研究认为,由于未完全再结晶组织的亚结构起辅助强化作用,从而导致不添加Mn时铝锂合金强度较高^[35]。

2 铝锂合金应用技术开发

铝锂合金材料应用时需要经历一系列相关的成型、连接等工艺,成为铝锂合金扩大应用的关键技术。因而,航空航天领域特别重视铝锂合金应用技术的开发。

2.1 旋压成型

旋压是制备运载火箭贮箱箱底和顶盖的先进近静成型技术。基于2195铝锂合金在运载火箭上的应用规划,航天材料及工艺研究所十多年之前就开始进行2195铝锂合金的旋压技术研究,包括适应旋压工艺的原始热处理状态,有限元模拟基础上旋压工艺参数优化,旋压并热处理后的组织与性能研究^[36-38],制备了两种铝锂合金(2195及自主开发的超高强铝锂合金2A55)直径 $\Phi 960$ mm($\Phi 940\sim\Phi 1\ 000$ mm)的半球形旋压壳体。另外,2020年航天材料及工艺研究所还旋压制备了我国首个最大、直径达 $\Phi 3\ 350$ mm的2195铝锂合金箱底(图7)^[39]。目前已报道的 $\Phi 940$ mm的2195铝锂合金旋压壳体经T6热处理后最低屈服强度510 MPa,伸长率6%以上^[38]。



(a) 直径3 350 mm 铝锂合金箱底旋壳体

(b) 直径3 350 mm 铝锂合金贮箱工程样机

图7 国内首个直径3 350 mm的2195铝锂合金箱底旋压壳体及铝锂合金贮箱工程样机^[35]

Fig. 7 Spinned Al-Li alloy tank bottom with 3 350 mm diameter and engineering prototype of Al-Li alloy tank^[35]

对于铝锂合金旋压成型,作者认为目前有几个重要的方面需开展更加深入的研究:(1)旋压温度对热处理后铝锂合金构件晶粒组织及力学性能的影响;(2)旋压成型后构件力学性能的分布,旋压用原材料是热轧并退火后的铝锂合金板材,旋压后不同位置的周向(平行于旋压线方向)及轴向与原始板材轧向角度不同,而由于铝锂合金本身的各向异性,将可能导致不同位置周向及轴向性能均产生较大差异;(3)旋压构件难以进行时效前的预变形过程,目前通常采用T6态时效,但其工艺参数需进行优化

研究。

2.2 焊接

作为一种新的固态连接技术,摩擦搅拌焊(Friction Stir Welding, FSW)无飞溅、烟尘,不需要焊丝和保护性的气体,接头没有气孔和凝固裂纹缺陷。铝锂合金采用FSW时,可以解决熔化焊时Li元素烧损、挥发的难题,获得性能优异的接头。国内已经进行了大量铝锂合金FSW工艺研究,前期以航空用2198及2060(CS24)铝锂合金。2015年后因为运载火箭应用的需求牵引,国内进行了较多的2195铝锂

合金FSW研究,主要集中于通过焊接工艺参数(焊接速度、旋转速度)、搅拌头优化设计等消除FSW接头缺陷,提高接头力学性能^[40-47]。作者查询到公开发表文献中,2195-T8铝锂合金FSW接头最高室温抗拉强度达432 MPa^[41]。天津航天长征火箭制造有限公司 $\Phi 5$ m级、厚度8 mm的2195-T8铝锂合金蠕变瓜瓣的FSW接头性能均匀,抗拉强度405~409 MPa。

表4 文献报道2195-T8铝锂合金FSW接头室温拉伸性能^[40-47]

Tab. 4 Tensile properties of 2195-T8 Al-Li alloy FSW joint at room temperature^[40-47]

| 厚度/mm | 形式 | 接头抗拉强度/MPa | 搅拌头结构 | 文献 |
|-------|------|------------|-------------|------|
| 5 | 板材 | 426 | - | [40] |
| 5 | 板材 | 432 | - | [41] |
| 7.5 | 板材 | 400 | 三平面带螺纹 | [42] |
| 5 | 板材 | 430 | 锥面带螺纹 | [43] |
| 8 | 板材 | 399~417 | 圆锥形带螺纹 | [44] |
| 8 | 板材 | 402~428 | 圆锥形带螺纹 | [45] |
| 8 | 蠕变瓜瓣 | 405~409 | 圆锥形螺纹+三斜面结构 | [46] |
| 12 | 板材 | 422 | 切面+圆锥形螺纹 | [47] |

运载火箭装备不可避免需使用熔化焊方式,因而航天应用部门对2195铝锂合金熔化焊(氩弧焊、TIG焊)非常重视。铝锂合金TIG焊过程中存在两个主要问题,分别是凝固裂纹敏感性和接头性能低,需通过配用焊丝成分优化加以解决。基于这一原因,国内对2195铝锂合金熔化焊适配焊丝进行了较多研究。李小飞等^[48]采用Al-Si-X共晶合金及高Cu含量的Al-Cu-X共晶系合金为焊丝,研究了2195铝锂合金氩弧焊接头性能和微观组织,结果表明Al-Si-X焊丝焊接接头冲击韧性及冷弯角明显较低。马云龙^[9]研究也表明这两种焊丝均能满足裂纹敏感性要求,但Al-Si-X焊丝焊接接头室温冲击韧性及冷弯角明显偏低。ZHANG等^[49]分别采用Al-Si-X焊丝及高Cu含量的Al-Cu-X焊丝,进行了喷射沉积2195-T6铝锂合金TIG焊接,发现Al-Cu-X焊丝接头强度和伸长率更高,气孔率更低。

基于上述基本规律,研究人员更多地通过高Cu的Al-Cu-X合金焊丝微合金化成分调整来优化2195铝锂合金TIG焊接头组织,提高接头性能。如李小飞在Al-Cu-X焊丝的基础上,研究了Sc微合金化的影响,发现Sc微合金化可适当提高接头强度,但会导致接头冲击韧性略有下降^[48]。郭飞跃等^[50]以Al-6.3Cu-1.1(MnZrTiVScB)焊丝进行了2 mm厚度2195-T8铝锂合金手工电弧焊研究,相应接头性能

(带余高) $\sigma_b=384$ MPa, $\sigma_{0.2}=315$ MPa。王永等^[51]也采用Al-Cu-Sc-Zr-Ti焊丝进行了2 mm厚度2195-T8铝锂合金,获得了强度达390~403 MPa的接头(去除余高)。

2.3 化学铣切

铝锂合金机械铣切加工时产生残余应力,故常用化铣加工代替。国内已经进行了航空用2197、2A97铝锂合金及航天贮箱用2195铝锂合金的化铣研究,主要集中于化铣液组成及化铣温度等对化铣速度、粗糙度等的影响。航空用2197及2A97铝锂合金采用的化铣液体系基本为:NaOH、铝离子、 Na_2S 、三乙醇胺(TEA)^[52-55]。然而,据反映化铣后可能造成航空用铝锂合金的疲劳性能的降低。近年航天部门开始进行了2195铝锂合金的化铣工艺研究,如航天材料及工艺研究所分别采用($\text{NaOH}+\text{Al}^{3+}+\text{Na}_2\text{S}+\text{三乙醇胺}$)和($\text{NaOH}+\text{Al}^{3+}+\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$)两种化铣液进行了2195铝锂合金的化铣,优化了化铣液体系($\text{NaOH}+\text{Al}^{3+}+\text{Na}_2\text{S}+\text{三乙醇胺}$)及适宜的化铣温度,而且该化铣工艺没有损害2195铝锂合金拉伸性能^[56]。天津航天长征火箭制造有限公司报道了以 $\text{NaOH}+\text{Al}^{3+}$ 为基础,添加三种添加剂(未公开),于 (80 ± 5) °C温度进行2195铝锂合金化铣时,化铣5 mm深度后粗糙度仅由2.1 μm 增加至2.3 μm ,基本保持不变,符合航天产品粗糙度的控制要求^[57]。

3 展望

从20世纪80年代以来,国内在铝锂合金的合金化成分设计、加工变形、热处理、腐蚀等方面的基础理论问题进行了深入系统的研究,高强铝锂合金成分设计方面可以说和国外保持同等水平。另外,作为能工业化生产和应用先进铝锂合金的少数几个国家之一,我国还突破了铝锂合金工程化研制与生产中的一系列关键技术,国产铝锂合金材料也在我国一些重要航空航天飞行器上获得应用。

我国铝锂合金研究虽然取得了很大成绩,但总体水平仍然落后于国外先进水平。主要表现在:(1)成熟铝锂合金材料和产品规格、品种有限;(2)研究工作的系统性、完整性和深入程度有待加强,特别是材料的性能与环境的适应性、材料服役性能与评价等方面的基础数据积累不够,疲劳性能及淬透性研究不系统;(3)产品批次稳定性有待提高,在一定程度上限制了铝锂合金的推广应用;(4)应用技术研究相对偏少,焊接、旋压等方面还需进一步加强研究。

未来我国应针对航空航天技术发展的需求,特别载人航天、新型运载火箭等的需求,加强高性能铝锂合金的基础研究,在深入研究铝锂合金的成分、微观组织和性能相关性的基础上,建立不同性能特征

(高强、耐腐蚀、耐损伤、可焊、高成形性、高淬透性)的铝锂合金设计准则,进一步研发有自主知识产权的新型第四代高性能铝锂合金,建立相应的材料规范,同时加快铝锂合金的应用技术研究,扩大铝锂合金的实际工程应用。相信在航空航天工业需求的牵引下,我国新一代铝锂合金的研究、生产和应用必将进入一个发展新时期。

参考文献

[1] RIOJA R J, LIU J. The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications [J]. *Metallurgical Materials Transaction A*, 2012, 43(9): 3325-3337.

[2] LIU D Y, MA Y L, LI J F, et al. Precipitate microstructures, mechanical properties and corrosion resistance of Al-1.0 wt% Cu-2.5 wt% Li alloys with different micro-alloyed elements addition [J]. *Materials Characterization*, 2020, 167: 110528.

[3] 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.

[4] 朱小辉. 新型铝锂合金(2099和2196合金)挤压材组织与性能的研究[D]. 长沙:中南大学, 2009.

ZHU X H. Study on the structures and properties of novel Al-Li alloy (2099 and 2199) extrusions[D]. Changsha: Central South University, 2009.

[5] 刘丹阳. 添加微量Zn、Mg的不同Cu/Li比铝锂合金性能与组织研究[D]. 长沙:中南大学, 2018.

LIU D Y. Properties and microstructures of different Cu/Li ratio Al-Li alloys with small addition of Zn/Mg[D]. Changsha: Central South University, 2018.

[6] LIU D Y, LI J F, LIN Y C, et al. Cu/Li ratio on the microstructure evolution and corrosion behaviors of Al-xCu-yLi-Mg alloys[J]. *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*, 2020, 33(9): 1201-1216.

[7] LI J F, LIU P L, CHEN Y L, et al. Mechanical properties and microstructures of Mg, Ag and Zn multi-microalloyed Al-(3.2~3.8)Cu-(1.0~1.4)Li alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(7): 2103-2112

[8] 李劲风, 陈永来, 张绪虎, 等. Cu、Li含量对Mg、Ag、Zn复合微合金化铝锂合金力学性能及微观组织的影响[J]. *宇航材料工艺*, 2015, 45(2):24-28.

LI J F, CHEN Y L, ZHANG X H, et al. Influence of Cu and Li contents on mechanical properties and micro-structures of Mg-, Ag- and Zn-microalloyed Al-Li alloys[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2015, 45(2):24-28.

[9] 马云龙. 运载火箭贮箱用2195铝锂合金性能及组织调控研究[D]. 长沙:中南大学, 2020.

MA Y L. Research on properties and microstructure control of 2195 Al-Li alloy for tank of launch vehicle[D]. Changsha: Central South University, 2020.

[10] LI J F, LI C X, PENG Z W, et al. Corrosion mechanism associated with T1 and T2 precipitates of Al-Cu-Li alloys in NaCl solution [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 460: 688-693.

[11] LI J F, LIU D Y, NING H, et al. Experimental quantification of "hardenability" of 2195 and 2050 Al-Li alloys by using cold-rolled sheets[J]. *Materials Characterization*, 2018, 137: 180-188.

[12] 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 C, LI J F, NING H, et al. Hardenability of 2060 Al-Li alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(11): 2451-2458.

[13] HUANG B P, ZHENG Z Q. Independent and combined roles of trace Mg and Ag additions in properties precipitation process and precipitation kinetics of Al-Cu-Li-(Mg)-(Ag)-Zr-Ti alloys [J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(12): 4381-4393.

[14] 王瑞琴, 郑子樵, 陈圆圆, 等. Ag、Mg合金化对Al-Cu-Li合金时效特性和显微组织的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38(4): 622-626.

WANG R Q, ZHENG Z Q, CHEN Y Y, et al. Effects of Ag, Mg micro-alloying on aging characteristics and microstructure of Al-Cu-Li alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(4): 622-626.

[15] 魏修宇, 郑子樵, 余玲娟, 等. Mg、Zn在2099铝锂合金中的微合金化作用[J]. *稀有金属材料与工程*, 2010, 39(9): 1583-1587.

WEI X Y, ZHENG Z Q, SHE L J, et al. Microalloying roles of Mg and Zn additions in 2099 Al-Li alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, 39(9): 1583-1587.

[16] 朱小辉, 郑子樵, 钟申. Mg和Zn对2099合金时效组织与拉伸性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(10): 1861-1867.

ZHU X H, ZHENG Z Q, ZHONG S. Effect of Mg and Zn on microstructure and tensile properties of 2099 alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(10): 1861-1867.

[17] 罗先甫, 郑子樵, 钟继发, 等. Mg、Ag、Zn对一种新型铝锂合金时效行为的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(7): 1833-1842.

LUO X F, ZHENG Z Q, ZHONG J F, et al. Effects of Mg, Ag and Zn multi-alloying on aging behavior of new Al-Cu-Li alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(7): 1833-1842.

[18] 王瑞琴. 2050合金微合金化及其组织和性能的研究[D]. 长沙:中南大学, 2009.

WANG R Q. Microalloying, structures and properties of 2050 alloy[D]. Changsha: Central South University, 2009.

[19] GUMBMAN E, LEFEBVRE W, GEUSER F D, et al. The effect of minor solute additions on the precipitation path of an Al-Cu-Li alloy[J]. *Acta Materialia*, 2016, 115: 104-114.

[20] LI J F, BIRBILIS N, LIU D Y, et al. Intergranular corrosion of Zn-free and Zn micro-alloyed Al-xCu-yLi alloys[J]. Corrosion Science, 2016, 105: 44-57.

[21] LIU D Y, LI J F, MA Y L, et al. A closer look at the role of Zn in the microstructure and corrosion of an Al-Cu-Li alloy[J]. Corrosion Science, 2018, 45: 220-231.

[22] 刘丹阳, 汪洁霞, 李劲风, 等. Mg、Ag、Zn微合金化对T6时效Al-Cu-Li系铝锂合金晶间腐蚀敏感性的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2018, 38(2): 183-190.

LIU D Y, WANG J X, LI J F, et al. Intergranular corrosion behavior of T6 aging treated micro-alloyed Al-Cu-Li alloys with Mg/Ag/Zn[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2018, 38(2): 183-190.

[23] LIU D Y, WANG J X, LI J F, et al. The effect of Ag element on the microstructure characteristic evolution of an Al-Cu-Li-Mg alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5): 11121-11134.

[24] 刘振振. Mg合金化对2060铝锂合金组织与性能的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2020.

LIU Z Z. Effect of Mg alloying on the structure and properties of 2060 Al-Li alloy[D]. Changsha: Central South University, 2020.

[25] WU L, CHEN Y C, LI X F, et al. Rapid hardening during natural aging of Al-Cu-Li based alloys with Mg addition[J]. Materials Science and Engineering A, 2019, 743: 741-744.

[26] LIU Z Z, LI J F, LIU D Y, et al. Sluggish precipitation strengthening in Al-Cu-Li alloy with a high concentration of Mg[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 11: 1806-1815.

[27] 李劲风, 陈永来, 张绪虎, 等. 一种新型超高强铝锂合金板材的组织与力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(12): 3715-3720.

LI J F, CHEN Y L, ZHANG X H, et al. Structures and mechanical properties of a super-high strength Al-Li alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(12): 3715-3720.

[28] 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 J F, NING H, LIU D Y, et al. Alloying and micro-alloying in Al-Cu-Li series alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(2): 258-279.

[29] MA Y L, LI J F. Variation of aging precipitates and strength of Al-Cu-Li alloys caused by small addition of rare earth elements[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(9): 4329-4339.

[30] LIU D Y, WANG J X, LI J F. The microstructures evolution and mechanical properties disparity in 2070 Al-Li alloy with minor Sc addition[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(11): 2151-2161.

[31] YU X X, YIN D F, YU Z M. Effects of cerium and zirconium microalloying addition on the microstructures and tensile

properties of novel Al-Cu-Li alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(8): 1917-1923.

[32] YU X X, ZHAO Z G, SHI D D, et al. Enhanced high-temperature mechanical properties of Al-Cu-Li alloy through T1 coarsening inhibition and Ce-containing intermetallic refinement[J]. Materials 2019, 12(9): 1521.

[33] YANG S J, DAI S L, SU B, et al. Influence of alloying elements on mechanical properties of Al-Li plates[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2004, 14(2): 321-324.

[34] 桑冯建, 郑子樵, 王海金. Mn在2297铝锂合金中的微合金化作用[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(3): 871-877.

SANG F J, ZHENG Z Q, WANG H J. Micro-alloying effects of Mn in 2297 Al-Li alloy[J]. Rare Metals Materials and Engineering, 2018, 47(3): 871-877.

[35] 陈小珍. Al-Cu-(Li)-Mg-Ag合金组织和耐热性能的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.

CHEN X Z. Microstructure and heat resistance of Al-Cu-(Li)-Mg-Ag alloy[D]. Changsha: Central South University, 2006

[36] 陈永来, 李茂盛, 吕宏军, 等. 2195铝锂合金可旋性研究[J]. 航天制造技术, 2006, (6): 28-30.

CHEN Y L, LI M S, LV H J, et al. Study on spinnability of 2195 Al-Li alloy[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2006, (6): 28-30.

[37] 温涛, 陈永来, 杜玥, 等. 旋压变形对2195铝锂合金组织和性能的影响[J]. 载人航天, 2020, 26(6): 717-722.

WEN T, CHEN Y L, DU Y, et al. Effect of spinning-deformation on microstructure and mechanical properties in 2195 Al-Li alloy[J]. Manned Spaceflight, 2020, 26(6): 717-722.

[38] 陈永来, 温涛, 朱宏伟, 等. 2195铝锂合金半球壳体旋压件制备与其组织性能研究[J]. 航天制造技术, 2019, (1): 17-21.

CHEN Y L, WEN T, ZHU H W, et al. Study on microstructure and mechanical properties of 2195 Al-Li hemispherical shell formed by spinning[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2019, (1): 17-21.

[39] 张娟娟. 新跨越! 我国首个3.35米直径铝锂合金火箭贮箱在火箭院诞生[EB/OL]. www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c16437139/content.html. 2020-12-28.

[40] 束彪. 2195铝锂合金焊接工艺及其接头组织性能研究[D]. 沈阳: 沈阳航空工业学院, 2010.

SHU B. Study on microstructures, properties and welding processes of 2195 Al-Li alloy[D]. Shenyang: Shenyang Institution of Aeronautical Engineering, 2010.

[41] 张华, 秦海龙, 吴会强. 工艺参数对2195铝锂合金搅拌摩擦焊接头力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2016, 37(4): 19-23.

ZHANG H, QIN H L, WU H Q. Effect of process parameters on mechanical properties of friction stir welded 2195 Al-Li alloy joints[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2016, 37(4): 19-23.

- [42] 吴洋. 2195-T8 铝锂合金搅拌摩擦焊接工艺参数对接头力学性能及显微组织的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- WU Y. Effects of processing parameters on mechanical property and microstructure of 2195-T8 Al-Li alloy during friction stir welding[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [43] LI J F, CHENG Y L, ZHANG X H, et al. Mechanical property and structures of friction-stir weld joint of 2195-T8 Al-Li alloy plate[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(3): 780-787.
- [44] 王雷, 王惠苗, 马方园, 等. 2195-T8 铝锂合金搅拌摩擦焊接头组织与力学性能[J]. 焊接, 2019, (3): 24-27.
- WANG L, WANG H M, MA F Y, et al. Microstructure and properties of 2195 Al-Li alloy welded joints by friction stir welding [J]. Welding and Joining, 2019, (3): 24-27.
- [45] 宋建岭, 王雷, 赵英杰, 等. 2195 铝锂合金搅拌摩擦焊接工艺[J]. 焊接, 2019, (1): 31-35
- SONG J L, WANG L, ZHAO Y J, et al. Friction stir welding process of 2195 Al-Li alloy[J]. Welding and Joining, 2019, (1): 31-35.
- [46] 宋建岭, 王昆, 李超, 等. 5 米级铝锂合金瓜瓣搅拌摩擦焊接工艺及组织性能研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2020, (4): 102-106.
- SONG J L, WANG K, LI C, et al. Study on process and microstructure and mechanical properties of 5 m Al-Li alloy melon-valve with FSW [J]. Missiles and Space Vehicles, 2020, (4): 102-106.
- [47] 张全胜. 2195-T8 铝锂合金厚板搅拌摩擦焊接研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- ZHANG Q S. Investigation on friction stir welding of 2195-T8 Al-Li alloy thick plate[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [48] 李小飞. 2195 铝锂合金焊接热裂纹敏感性和焊接材料研究[D]. 北京: 北京航空材料研究院, 2007.
- LI X F. Study on hot crack sensitivity and welding material of 2195 Al Li alloy [D]. Beijing: Beijing Institute of Aeronautical Materials, 2007.
- [49] ZHANG Y H, LI H, LUO C G, et al. Effects of filler wires on the microstructure and mechanical properties of 2195-T6 Al-Li alloy spray formed by TIG welding[J]. Materials, 2019, 12 (21): 3559
- [50] 郭飞跃. 2195 铝锂合金焊接接头组织与性能[D]. 长沙: 中南大学, 2003.
- GUO F Y. Structure and properties of 2195 Al Li alloy welded joint[D]. Changsha: Central South University, 2003.
- [51] 王永, 李德富, 胡捷, 等. 含钕焊料对 2195 铝锂合金焊缝组织性能的影响[J]. 稀有金属, 2003, 27(6): 842-844.
- WANG Y, LI D F, HU J, et al. Effect of scandium on microstructure of 2195 joint aluminium-lienchanche [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2003, 27(6): 842-844.
- [52] 易慧芝, 邓飞跃, 张忠亭. 2197 铝锂合金化学铣切工艺研究[J]. 表面技术, 2010, 39(4): 73-76.
- YI H Z, DENG F Y, ZHANG Z T. Study on the chemical milling process of 2197 Al-Li alloy [J]. Surface Technology, 2010, 39(4): 73-76.
- [53] 毛大恒, 韩德夫, 周亚军, 等. 2197 铝锂合金的化学铣切工艺[J]. 机械工程材料, 2011, 35(5): 77-79.
- MAO D H, HAN D F, ZHOU Y J, et al. Chemical milling technology of 2197 Al-Li alloy [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2011, 35(5): 77-79.
- [54] 刘刚, 李昊, 孟海燕. 2197 铝锂合金碱性化铣液中 Al3+ 浓度对化铣表面质量的影响[J]. 材料保护, 2015, 48(8): 67-69.
- LIU G, LI H, MENG H Y. Influences of concentration of aluminum ion in alkaline milling solution on milling surface quality of 2197 Al-Li alloy [J]. Journal of Materials Protection, 2015, 48 (8): 67-69.
- [55] 孟莉莉, 朱彦海, 曾元松. 2A97 铝锂合金化学铣切工艺探讨[J]. 材料保护, 2016, 49(12): 46-49.
- MENG L L, ZHU Y H, ZENG Y S. Chemical milling process of 2A97 Al-Li alloy [J]. Journal of Materials Protection, 2016, 49 (12): 46-49.
- [56] 刘凤娟, 陈永来, 于峰, 等. 2195 铝锂合金的化学铣切工艺优化[J]. 机械工程材料, 2019, 43(2): 34-38.
- LIU F J, CHEN Y L, YU F, et al. Optimization of chemical milling process of 2195 Al-Li alloy [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(2): 34-38.
- [57] 王帅东, 张昕宇, 赵武军, 等. 2195 铝锂合金碱性化学铣切工艺探究[J]. 电镀与精饰, 2020, 42(1): 33-35.
- WANG S D, ZHANG X Y, ZHAO W J, et al. Study on the alkaline milling process of 2195 Al-Li alloy [J]. Plating and Finishing, 2020, 42(1): 33-35.