

特约专栏

铝锂合金组织-性能相关性及其新型铝锂合金设计

李劲风¹, 李昊然¹, 王正安²

(1. 中南大学材料科学与工程学院 有色金属材料科学与工程教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083)

(2. 西南铝业(集团)有限责任公司, 重庆 401326)

摘要: 铝锂合金具有低密度、高弹性模量、高比强度和比刚度、低疲劳裂纹扩展速率、较好的高温及低温性能等特性, 是理想的航空航天材料。国际上十分重视铝锂合金新材料开发, 并不断推出新的铝锂合金牌号。介绍了铝锂合金中的主要时效析出相, 综述了铝锂合金力学性能、耐腐蚀性能、疲劳裂纹扩展速率与时效析出相的相关性。结合合金化元素含量及微合金化元素对铝锂合金时效析出相的影响, 介绍了高强、超高强铝锂合金, 耐腐蚀铝锂合金, 耐损伤铝锂合金, 高淬透性铝锂合金的开发情况, 总结了国内新型铝锂合金开发的不足, 提出了未来新型铝锂合金的研究方向。

关键词: 铝锂合金; 时效析出相; 超高强; 耐损伤; 耐腐蚀; 淬透性

中图分类号: TG146. 21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2022)10-0796-12

引用格式: 李劲风, 李昊然, 王正安. 铝锂合金组织-性能相关性及其新型铝锂合金设计[J]. 中国材料进展, 2022, 41(10): 796-807.

LI J F, LI H R, WANG Z A. Correlations between Properties and Structures of Al-Li Alloys and Novel Alloy Design[J]. Materials China, 2022, 41(10): 796-807.

Correlations between Properties and Structures of Al-Li Alloys and Novel Alloy Design

LI Jinfeng¹, LI Haoran¹, WANG Zheng'an²

(1. Key Laboratory of Nonferrous Metal Materials Science and Engineering of Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

(2. Southwest Aluminum (Group) Co., Ltd., Chongqing 401326, China)

Abstract: Al-Li alloys are ideal aerospace materials due to their properties such as low density, high elastic modulus, high specific stiffness and strength, low fatigue crack propagation rate, good property at high and cryogenic temperatures. The research on novel Al-Li alloy materials attracted great attention all over the world, and new Al-Li alloy brands have been registered constantly. This paper introduces the main aging precipitates in Al-Li alloys, and summarizes the correlation between aging precipitates and mechanical properties, corrosion properties and fatigue crack propagation rate of Al-Li alloys. Combined with the influence of alloying elements and microalloying elements on the aging precipitates, the development of high strength and super-high strength Al-Li alloys, corrosion resistant Al-Li alloys, damage resistant Al-Li alloys and high hardenability Al-Li alloys is introduced. The shortcomings of domestic development of novel Al-Li alloys are summarized, and some development directions on Al-Li alloys in the future are proposed.

Key words: Al-Li alloy; aging precipitates; super-high strength; damage resistance; corrosion resistance; hardenability

1 前言

锂(Li)是最轻的金属元素, 在铝及铝合金中添加 Li 即形成一个铝合金类型——铝锂合金。在铝合金中添加

1.0%(质量分数) Li 可降低密度 3%, 提高模量 6%。新型铝锂合金不仅具有低密度、高弹性模量的特点, 同时还具有高比强度、高比刚度、低疲劳裂纹扩展速率、较好的高温及低温性能等特性^[1], 是理想的航空航天材料。图 1 所示为铝锂合金与传统铝合金部分性能比较^[2, 3]。

铝锂合金的研究和开发至今已有近百年历史。就成分体系而言, 铝锂合金主要包括 Al-Mg-Li 系(主要为前苏联和俄罗斯开发)及 Al-Cu-Li 系(目前国际铝锂合金主

收稿日期: 2022-06-29 修回日期: 2022-07-31

第一作者: 李劲风, 男, 1971 年生, 教授, 博士生导师,

Email: lijinfeng@csu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202206018

流体系)。就铝锂合金发展阶段而言,目前广泛认为已发展了三代铝锂合金,且在欧美和俄罗斯的运载火箭、民用客机和战机上均已获得广泛应用。第二代和第三代铝锂合金成分特征如表 1 所示^[4]。

国内铝锂合金研究始于 20 世纪 80 年代,初期以跟踪仿制为主,进入本世纪后开始进行自主研发。由于航天和航空领域的需求牵引,2010 年以来国内掀起了对铝锂合金焊接成型、旋压、热处理等多方面技术的研究热潮^[5-15]。目前,部分第三代铝锂合金已在国内航空航天领域开始应用(图 2)^[4,16]。

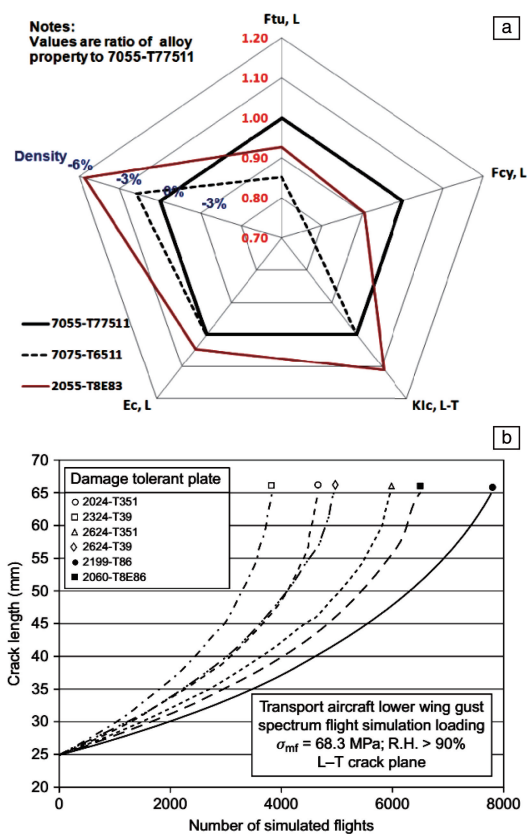


图 1 铝锂合金与传统铝合金部分性能比较^[2, 3]: (a) 2055 铝锂合金, (b) 2199 及 2060 铝锂合金

Fig. 1 Property comparison between several Al-Li alloys and conventional Al alloys^[2, 3]: (a) 2055 Al-Li alloy, (b) 2199 and 2060 Al-Li alloys

表 1 第二代、第三代铝锂合金成分主要特征^[4]

Table 1 Composition characteristics of the 2nd and 3rd generation of Al-Li alloys^[4]

Generation	Cu content, $\omega/\%$	Li content, $\omega/\%$	Micro-alloying elements	Brands in China
2 nd	<2.5	>2.0	Zr+(Mg)	2090, 8090, 2091
3 rd	>2.5	<2.0	Zr+(Mn)+(Mg)+(Ag)+(Zn)	2195, 2297, 2099, 2050, 2A97

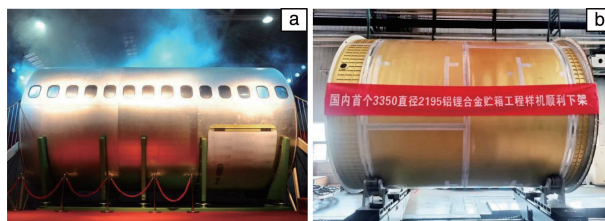


图 2 铝锂合金在国内航空航天领域的应用^[4, 16]: (a) C919 大型客机铝锂合金机身等直段部段, (b) 直径 3350 mm 的铝锂合金贮箱

Fig. 2 Domestic applications of Al-Li alloys in airplane and aerospace fields^[4, 16]: (a) liner part of C919 fuselage, (b) fuel tank with diameter of 3350 mm

由于航空航天的减重需求,国际上铝锂合金仍然在快速发展。近 10 年国际上铝锂合金发展表现出以下几个特征:首先,不断推出新的铝锂合金牌号,2011 年以来,通过调整主合金元素 Cu, Li 含量或添加微合金化元素 Mg, Ag, Zn 等,国际上开发了多个新型铝锂合金牌号;其次,铝锂合金产品形式和规格也在不断发展,同一牌号铝锂合金产品从以板材形式为主发展为型材和模锻件均有,板材截面厚度规格也从中板发展为中厚板和超厚板。

综合最近国际上开发的铝锂合金的性能及美国铝业公司(Alcoa)、加拿大铝业公司(Alcan)等对高性能铝锂合金的研发目标,新型铝锂合金的目标性能特征包括:密度低、比强度高;成型性能优良;更高的静强度(尤其是屈服强度)和断裂韧性,裂纹扩展速率、疲劳性能、耐腐蚀性能以及弹性模量等性能和第三代铝锂合金相当。

新型铝锂合金开发包括新的成分设计、新的产品形式及新的热处理工艺开发等多个方面,其中成分设计应该是其重点。本文主要从成分设计及组织调控角度进行阐述。

2 铝锂合金的组织-性能相关性

第二相类型、尺寸及空间分布和晶粒特征等组织特征是决定铝锂合金性能的主要因素,而组织一方面由其成分决定,另一方面也与其加工成型和热处理过程密切相关。本部分主要阐述铝锂合金部分性能与其组织(主要是时效析出相)的相关性。

2.1 主要时效析出相

Al-Cu-Li 系铝锂合金主要时效强化相包括 T_1 相(Al_2CuLi)、 δ' 相(Al_3Li)和 θ' 相(Al_2Cu)。随 Cu 含量由 2.0% 以下增加至 4.0% 以上、Li 含量由 2.5% 降低至 1.0% 甚至以下,铝锂合金主要时效强化相组成分别为 δ' 、 $\delta'+T_1$ 、 $T_1+\theta'$ 等几种类型^[17]。

δ' 相为立方超点阵晶体结构($L1_2$)的球状亚稳相,晶

格常数为 $a=0.405\text{ nm}$ 。 δ' 相与铝基体共格,其共格关系为 $(100)_{\delta'}/(100)_{\text{Al}}$, $[001]_{\delta'}/[001]_{\text{Al}}$ ^[18]。 θ' 相为四方结构的圆盘状亚稳相,其晶格常数分别为: $a=0.404\text{ nm}$, $c=0.58\text{ nm}$ 。 θ' 相与铝基体半共格,与基体的取向关系为: $(100)_{\theta'}/(100)_{\text{Al}}$, $[001]_{\theta'}/[001]_{\text{Al}}$ ^[18]。

与 δ' 相和 θ' 相不同, T_1 相为密排六方结构的圆盘状平衡相,其晶格常数分别为: $a=0.4965\text{ nm}$, $c=0.9345\text{ nm}$ ^[19]。 T_1 相在铝基体 $\{111\}_{\text{Al}}$ 面析出,与铝基体半共格,其取向关系为: $(0001)_{T_1}/(111)_{\text{Al}}$, $[1010]_{T_1}/[110]_{\text{Al}}$ ^[18-20]。 T_1 相既可在晶内析出,也可在晶界析出。

铝锂合金时效时在晶界还可能析出平衡相 T_2 相 (Al_6CuLi_3)。另外,若 Al-Cu-Li 系铝锂合金添加了 Mg 元素,时效时晶内也可能析出 S' 相 (Al_2CuMg)^[12]。

2.2 强度与时效析出相的相关性

时效析出相不同将导致铝锂合金常规力学性能的巨大差异。图 3 是 Al-Cu-Li 系铝锂合金 1441 (Al-1.78Cu-1.87Li-0.96Mg-0.11Zr, 质量分数) 薄板双级 T8 峰时效 (150 °C/32 h) 后的 $[100]_{\text{Al}}$ 晶带轴选区电子衍射 (selected area electron diffraction, SAED) 图谱及透射电镜暗场 (dark field, DF) 照片。除基体衍射斑点之外,仅 $\{110\}_{\text{Al}}$ 和 $\{100\}_{\text{Al}}$ 位置存在 δ' 相衍射斑点(图 3a),TEM-DF 照片中可观察到大量球状 δ' 相(图 3b),表明,该铝锂合金时效析出相主要为 δ' 相。力学性能测试表明,具有上述微观组织的 1441 铝锂合金屈服强度为 393 MPa,抗拉强度为 500 MPa,伸长率为 12%^[21]。

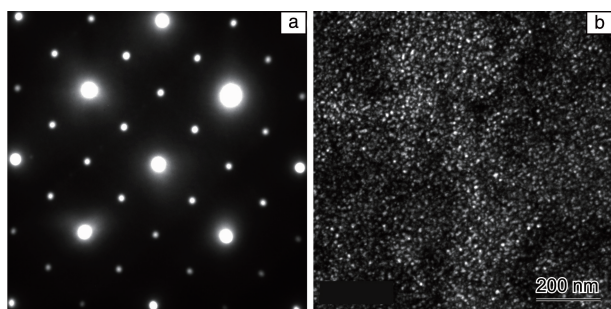


图 3 1441 铝锂合金 T8 时效后选区电子衍射 (selected area electron diffraction, SAED) 图谱及透射电镜暗场 (dark field, DF) 照片^[21]: (a) $[100]_{\text{Al}}$ SAED 图谱, (b) δ' 相, TEM-DF 照片

Fig. 3 SAED pattern and TEM-DF image of 1441 Al-Li alloy after T8 aging^[21]: (a) $[100]_{\text{Al}}$ SAED pattern, (b) δ' precipitates, TEM-DF image

图 4 为另一种 Al-Cu-Li 系铝锂合金 2A55 (Al-3.82Cu-1.22Li-0.41Mg-0.36Ag-0.45Zn-0.31Mn-0.1Zr) T8 峰时效 (4.5%预变形, 150 °C/35 h) 后 SAED 图谱及 TEM-DF 照片^[22],其微观组织特征明显不同于 1441 铝锂合金。图 4a 的 $[100]_{\text{Al}}$ 晶带轴 SAED 图谱中,存在沿 $\{200\}_{\text{Al}}$ 及

$\{110\}_{\text{Al}}$ 分布的衍射茫线,并在 $1/3\{220\}_{\text{Al}}$ 及 $2/3\{220\}_{\text{Al}}$ 位置存在非常明显的衍射斑点,图 4b 的 $[112]_{\text{Al}}$ 晶带轴 SAED 图谱中存在明显的沿 $1/3\{220\}_{\text{Al}}$ 及 $2/3\{220\}_{\text{Al}}$ 分布的衍射茫线,表明 2A55 铝锂合金主要时效析出相为 T_1 相,并有较多 θ' 相,同时存在部分原子偏聚 (Guinier Preston, GP) 区,TEM-DF 照片中可观察到上述相应析出相(图 4c 和 4d),即该铝锂合金主要时效析出相为 $T_1+\theta'$ 类型。力学性能测试表明,具有上述微观组织的 2A55 铝锂合金力学性能如下:屈服强度 606 MPa、抗拉强度 631 MPa、伸长率 10.5%^[22]。

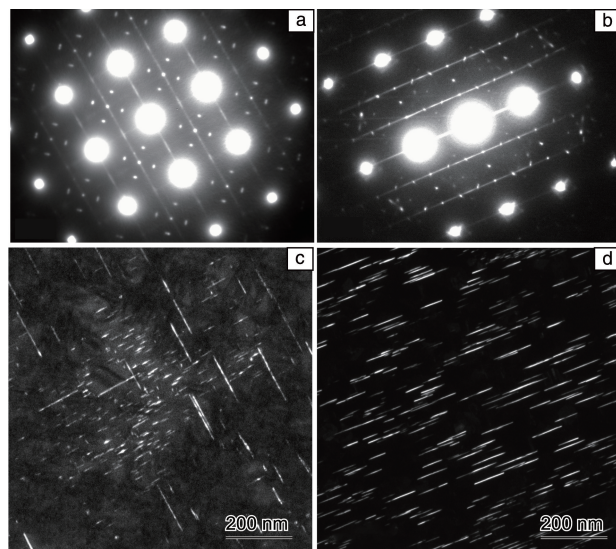


图 4 2A55 铝锂合金 T8 时效后 SAED 图谱及 TEM-DF 照片^[22]: (a) $[100]_{\text{Al}}$ SAED 图谱; (b) $[112]_{\text{Al}}$ SAED 图谱; (c) θ' 相和 GP 区, DF 照片; (d) T_1 相, DF 照片

Fig. 4 SAED patterns and TEM-DF images of 2A55 Al-Li alloy after T8 aging^[22]: (a) $[100]_{\text{Al}}$ SAED pattern; (b) $[112]_{\text{Al}}$ SAED pattern; (c) θ' precipitates and GP zones, DF image; (d) T_1 precipitates, DF image

经计算,上述 1441 铝锂合金中主合金元素 (Cu, Li) 的摩尔分数总量为 7.42%,高于 2A55 铝锂合金中的总量 6.58%。然而 1441 铝锂合金强度远低于 2A55 铝锂合金,这说明铝锂合金强度由其析出相类型及含量决定,而不是简单决定于合金化元素总量。研究表明,时效析出相为 $T_1+\theta'$ 类型的铝锂合金强度远高于 δ' 类型的铝锂合金^[23-25]。

上述强度差异主要与时效析出相强化机理及强化效果不同有关。 T_1 相在欠时效时位错可以切过,而峰时效及过时效时主要为绕过强化机制; θ' 相与铝基体半共格,欠时效至时效阶段均以绕过强化机制为主; δ' 相在欠时效阶段以切过强化机制为主,但峰时效长大后,其强化方式转变为绕过机制^[26]。圆盘状 T_1 相和 θ' 相强化效果

主要与他们在滑移面 $\{111\}_{\text{Al}}$ 投影有效间距有关^[17, 27, 28]。假定球状析出相转变为圆盘状析出相时, 单位体积内析出相数密度及单个析出相体积不变, Nie 等分别基于切过强化机制和绕过强化机制计算了圆盘状 T_1 相及 θ' 相强化效果与球状析出相 δ' 相强化效果的比值 ($\Delta\tau(\text{plate})/\Delta\tau(\text{sphere})$) 随长宽比变化的关系曲线, 如图 5 所示^[17, 27, 28]。在两种强化机制下, T_1 相和 θ' 相强化效果均

显著大于 δ' 相, 而且 T_1 相和 θ' 相强化效果均随其长宽比增加而逐渐增大; 同时, 在相同的长宽比条件下, $\{111\}_{\text{Al}}$ 晶面上析出的圆盘状 T_1 相引起的强化效果大于 $\{100\}_{\text{Al}}$ 晶面上析出的圆盘状 θ' 相。另外, T_1 相长宽比通常大于 θ' 相长宽比。综合而言, 铝锂合金主要时效析出相强化效果顺序为: T_1 相 $>$ θ' 相 $>$ δ' 相^[17]。

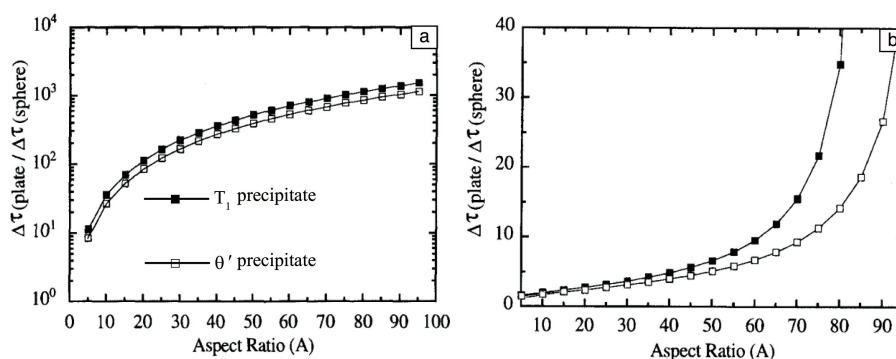


图 5 基于切过强化机制及绕过强化机制时圆盘状 T_1 相及 θ' 相强化效果与球状 δ' 相强化效果的比值 ($\Delta\tau(\text{plate})/\Delta\tau(\text{sphere})$) 随长宽比变化的关系曲线^[17, 27, 28]: (a) 切过强化机制, (b) 绕过强化机制

Fig. 5 Variations of $\Delta\tau(\text{plate})/\Delta\tau(\text{sphere})$ with aspect ratio for plate-shaped T_1 and θ' precipitates^[17, 27, 28]: (a) shearing strengthening mechanism, (b) by-passing strengthening mechanism

2.2 腐蚀性能与微观组织的相关性

抗腐蚀能力是铝锂合金需考虑的主要性能之一, 而腐蚀性能同样与时效析出相密切相关。 T_1 相同时含有不活泼元素 Cu 和活泼元素 Li。腐蚀初期 T_1 相电位较负, 作为阳极开始发生自身的阳极溶解, 其中活泼元素 Li 优先溶解, 不活泼元素 Cu 则逐渐富集; 结果腐蚀后 T_1 相电位正移, 从而促进其边缘基体(晶内基体和晶界边缘的无沉淀带)的电化学溶解和腐蚀^[29-31]。晶界析出的 T_2 相也同时含有不活泼元素 Cu 和活泼元素 Li, 其腐蚀机理与 T_1 相类似。但由于 T_2 相 Cu 含量较低, 腐蚀后期 T_2 相促进其边缘基体电化学溶解腐蚀能力降低^[30-32]。 θ' 相主要

含有不活泼元素 Cu, 将作为阴极相并促进其边缘基体的阳极溶解^[30]。 δ' 相电化学性质虽未进行检测, 但根据成分特征判定其应该一直作为阳极相, 且 δ' 相不连续存在, 不会导致相应铝锂合金的严重腐蚀。

晶界析出相种类和分布的差异将导致铝锂合金腐蚀行为的差异。图 6 和图 7 所示分别为几种不同 Cu/Li 含量比铝锂合金微观组织及在晶间腐蚀介质中浸泡腐蚀 6 h 后的截面金相照片^[33]。高 Cu/Li 含量比铝锂合金晶界析出较连续的 T_1 相(图 6a), 中等 Cu/Li 含量比铝锂合金晶界析出的 T_1 相减少(图 6b), 低 Cu/Li 含量比铝锂合金晶界析出不连续 $\delta(\text{AlLi})$ 相(图 6c)。当晶界析出连续 T_1 相,

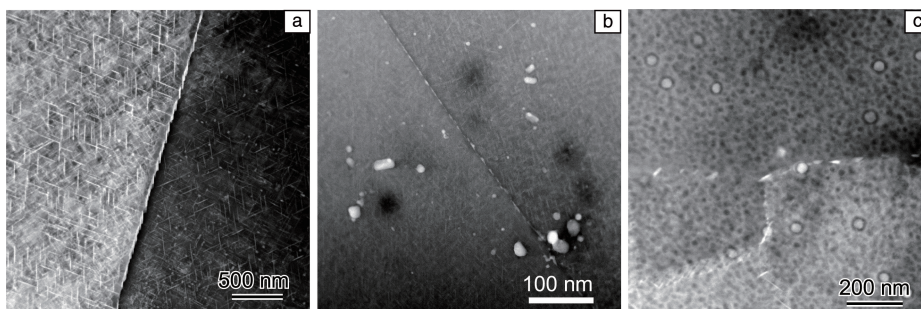


图 6 不同 Cu/Li 含量比铝锂合金 175 °C 时效 24 h 后晶界区域扫描透射电子显微镜(STEM)照片^[33]: (a) 高 Cu/Li 含量比, (b) 中 Cu/Li 含量比, (c) 低 Cu/Li 含量比

Fig. 6 STEM images of the grain boundary area in Al-Li alloys with different Cu/Li ratio after aging for 24 h at 175 °C^[33]: (a) high Cu/Li ratio, (b) medium Cu/Li ratio, (c) low Cu/Li ratio

而晶内析出相很少,其晶间腐蚀敏感性较大(图 7);若此时晶内同时析出较多 T_1 相,将容易发生以晶粒腐蚀为特征的坑蚀并伴随晶间腐蚀。若晶界析出不连续 δ 相,晶间腐蚀敏感性明显降低^[33]。

2.3 疲劳裂纹扩展速率与微观组织的相关性

疲劳裂纹扩展速率是航空用铝锂合金的主要目标性能之一,与析出相类型和尺寸密切相关。图 8 及图 9 所示分别为 2A97 铝锂合金 T6 时效(165 °C/60 h)及 T8 低温(135 °C)时效不同时间的 TEM 照片及相应的疲劳裂纹扩展速率曲线($da/dN \sim \Delta K$)^[34, 35]。T8 短时间(12 h)时效,析出相为大量细小密集的 δ' 相及较少非常细小的

T_1 相(图 8a 和 8b),此时合金疲劳裂纹扩展速率最低,抗疲劳裂纹扩展性能最优(图 9), $\Delta K = 30 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 时裂纹扩展速率为 $4.5 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{cycle}^{-1}$,且直至 ΔK 为 $35 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 才发生断裂,可承受的应力强度因子范围较大。时效时间延长至 48 h 后, δ' 相和 T_1 相尺寸增大,且 T_1 相数量急剧增加(图 8c 和 8d);时效时间长达 120 h 时,合金中的 δ' 相和 T_1 相继续长大,但 δ' 相的数量减少(图 8e 和 8f)。这两种析出相组成情况下,合金疲劳裂纹扩展速率持续增加,抗疲劳裂纹扩展性能降低, $\Delta K = 30 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 时裂纹扩展速率分别为 6.5×10^{-3} 及 $6.8 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{cycle}^{-1}$ 。

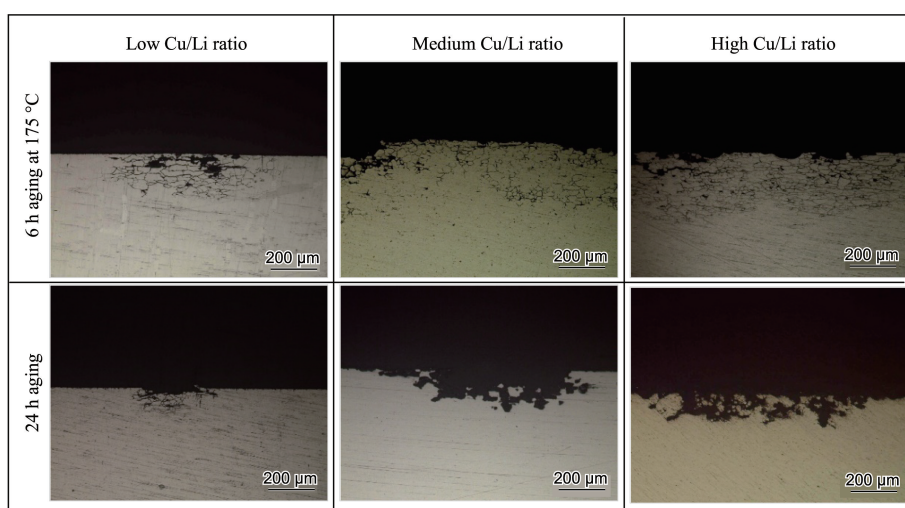


图 7 不同 Cu/Li 含量比铝锂合金时效不同时间后浸泡腐蚀 6 h 后的截面金相照片^[33]

Fig. 7 Typical corrosion sectional metallographs of Al-Li alloys with different Cu/Li ratio aged for different time after 6 h immersion^[33]

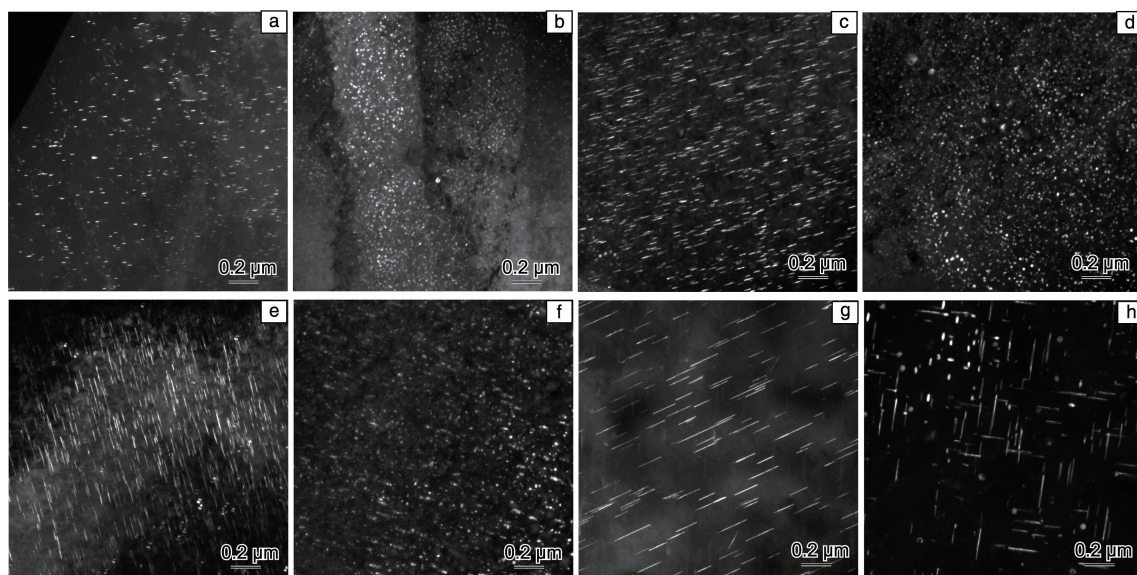


图 8 2A97 铝锂合金 T6 时效(165 °C/60 h)及 T8 低温(135 °C)时效不同时间的 TEM-DF 照片^[34, 35]: (a) T8, 12 h, T_1 相; (b) T8, 12 h, δ' 相; (c) T8, 48 h, T_1 相; (d) T8, 48 h, δ' 相; (e) T8, 120 h, T_1 相; (f) T8, 120 h, δ' 相; (g) T6, T_1 相; (h) T6, θ' 相, δ' 相

Fig. 8 TEM-DF images of 2A97 Al-Li alloy after T6 aging and T8 aging for different time^[34, 35]: (a) T8, 12 h, T_1 ; (b) T8, 12 h, δ' ; (c) T8, 48 h, T_1 ; (d) T8, 48 h, δ' ; (e) T8, 120 h, T_1 ; (f) T8, 120 h, δ' ; (g) T6, T_1 ; (h) T6, θ' and δ'

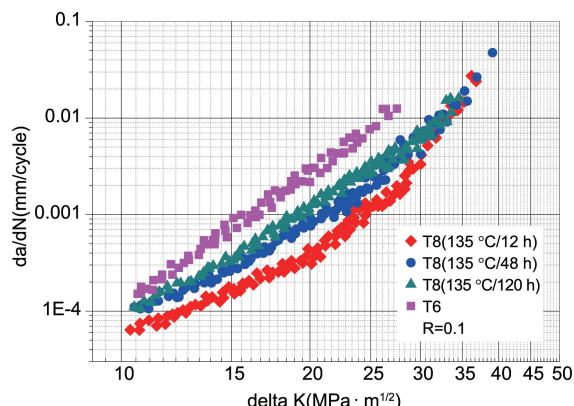


图 9 不同时效状态下 2A97 铝锂合金的疲劳裂纹扩展速率曲线^[34, 35]

Fig. 9 Fatigue crack propagation rate curves of 2A97 Al-Li alloy after different aging^[34, 35]

T6 时效 (165 °C/60 h) 时, 2A97 铝锂合金主要析出 T_1 相和 θ' 相, 仅有少量粗大 δ' 相 (图 8g 和 8h), 对应的疲劳裂纹扩展速率较高, $\Delta K = 25 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 时疲劳裂纹扩展速率为 $7.5 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{cycle}^{-1}$, 且在 ΔK 为 $27 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 时就已经发生失稳断裂。

在铝锂合金中, 位错可以切过细小 δ' 相及细小 T_1 相^[26], 即细小 δ' 相及细小 T_1 相可以促进共面滑移, 增加位错滑移可逆性, 从而降低裂尖应力集中程度及塑性累积水平, 促进裂纹的闭合效应, 提高疲劳裂纹扩展抗力。而粗大、密集的 T_1 相及半共格的 θ' 相抑制共面滑移, 易于造成应力集中, 降低裂纹扩展抗力^[18, 34-36]。上述微观组织与疲劳裂纹扩展速率关系表明, 进行耐损伤铝锂合金成分设计及热处理工艺设计时, 应优先考虑析出细小 δ' 相及细小 T_1 相的铝锂合金成分体系; 而形成密集 T_1 相及半共格 θ' 相的成分体系及热处理工艺则不能优先考虑应用于耐损伤铝锂合金。

3 新型铝锂合金设计

基于时效析出相与性能的相关性, 结合成分与析出相类型的关系, 通过成分设计及工艺 (如热处理工艺) 优化调控时效析出相类型及含量, 可以开发具有不同性能的铝锂合金, 这是开发新型铝锂合金的基础之一。以下分别阐述几种不同类型新型铝锂合金的设计研发情况。

3.1 高强、超高强铝锂合金

根据铝锂合金中不同时效强化相强化效果差异, 开发高强、超高强铝锂合金应优先考虑析出高体积分数的 $T_1 + \theta'$ 相。相同峰时效条件下, 影响铝锂合金析出相类型及含量的主要因素为 Cu 和 Li 含量。系列研究表明, 铝锂合金中 Cu/Li 含量比较低 (Cu 含量较低而 Li 含量较

高) 时有利于析出 δ' 相, 而 Cu/Li 含量比较高时则有利于 T_1 相和 θ' 相的析出^[37-39]。结合上述现象, 研究人员总结了如下 Cu (3.0% ~ 4.4%)、Li (0.8% ~ 1.4%) 含量对 Al-Cu-Li 系铝锂合金强度的影响规律: 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 占 Cu 和 Li 总原子分数比例增加, 强度有增加的趋势^[37-40]。马云龙基于上述分析, 进一步以 Cu+Li 总原子分数及 Cu 占 Cu 和 Li 总原子分数的比例为因变量, 建立标准成分范围内 2195 铝锂合金强度与 Cu, Li 含量的数学关系^[40]。

在不改变析出相类型的基础上, 通过微合金化元素促进强化效果最好的 T_1 相析出是开发高强、超高强铝锂合金的有效手段。中南大学开展了铝锂合金中 Mg, Ag, Zn 系列的微合金化及复合微合金化研究, 结果表明 Mg、Mg+Ag、Mg+Zn、Mg+Ag+Zn 添加有利于促进 T_1 相的形核, 增加 T_1 相密度和体积分数, 加速时效响应速度, 进而提高铝锂合金强度^[41-45]。综合而言, Mg+X (X = 无、Ag 或/和 Zn) 微合金化强化效果呈现如下规律: Mg+Ag+Zn > Mg+Ag > Mg+Zn > Mg^[4]。

基于上述 Cu, Li 含量对铝锂合金强度影响规律及 Mg, Ag, Zn 微合金化元素作用效果及机理方面的研究成果, 国内形成了 (超) 高强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, 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), 并由西南铝业 (集团) 有限责任公司进行了工业化生产, 该铝锂合金 T8 时效时典型强度可达 640 MPa, 检测到最高强度为 670 MPa (表 2 和表 3)^[22, 46]。目前, 该超高强铝锂合金已由航天材料及工艺研究所通过旋压工艺制备了半球形旋压壳体, 并经焊接制备了运载火箭燃料贮箱样机。

3.2 耐蚀铝锂合金

结合铝锂合金中不同析出相的腐蚀机理, 开发耐蚀铝锂合金的一个重要方向是通过合金化或微合金化改变 T_1 等析出相的电化学性质并降低晶界 T_1 相比比例。国内研究发现在 Al-2.8Cu-1.7Li-0.4Mg-0.3Mn-0.12Zr (质量

表 2 “十三五”期间我国设计的一种超高强铝锂合金成分^[22, 46]

Table 2 Chemical composition of a novel super high strength Al-Li alloy in China during the 13th five-year plan period (wt %)^[22, 46]

Alloy	Cu	Li	Mg	Ag	Zn	Mn	Zr	Al
2A96	3.81	1.28	0.41	0.42	0.39	0.28	0.11	Bal.
2A55	3.82	1.22	0.41	0.36	0.45	0.31	0.1	Bal.

表 3 2 mm 及 10 mm 厚度超高强铝锂合金板材 T8 峰时效力学性能^[22, 46]

Table 3 Tensile properties of the T8 peak-aged super-high strength Al-Li alloy plates with 2 mm and 10 mm thickness^[22, 46]

Thickness/ pre-deformation	YS/MPa	UTS/MPa	EL/%
(2A96) 2 mm/6%	582	615	10.2
(2A96) 10 mm/3%	641	675	12.2
(2A55) 10 mm/4.5%	614	640	13.7

分数,下同)铝锂合金中添加 Zn 元素,可以明显提高其耐晶间腐蚀能力,如图 10 所示^[47]。其相关机理如下: Zn 元素进入晶界 T₁ 相和 T₂ 相,形成含 Zn 的 T₁ 相(Al₂-(CuZn)Li)及 T₂ 相(Al₆(CuZn)Li₃)^[31, 47, 48]; T₁ 相和 T₂ 相电位较负,在腐蚀初期作为阳极开始发生自身的电化学腐蚀,结果导致活泼元素 Li 的优先溶解,而不活泼元素 Cu 逐渐富集;但含 Zn 的 T₁ 相和 T₂ 相腐蚀后 Cu 元素富集减少,腐蚀后电位移移程度降低,从而降低对其边缘基体(晶内基体和晶界边缘的无沉淀带)电化学溶解和腐蚀的促进作用,相应地提高铝锂合金耐腐蚀能力。

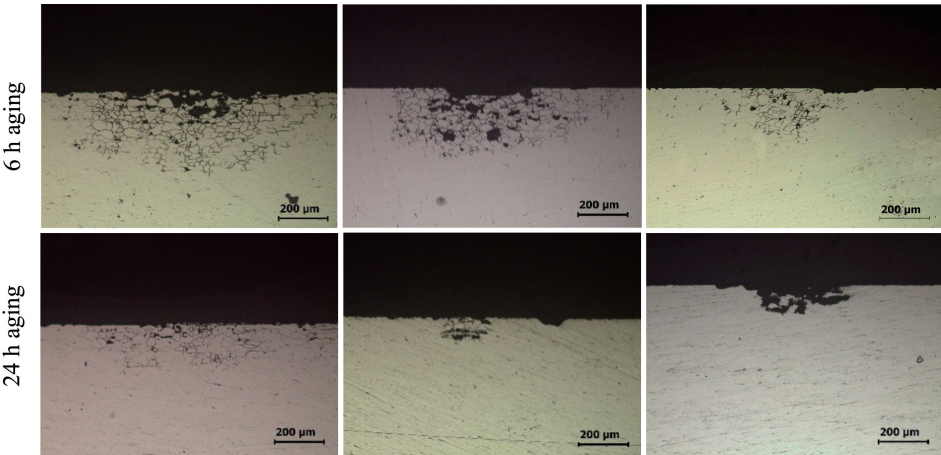


图 10 添加不同含量 Zn 的 Al-2.8Cu-1.7Li(质量分数)铝锂合金 175 °C 时效不同时间后在晶间腐蚀介质中浸泡 6 h 后的典型截面腐蚀形貌^[47]: (a) 不添加, (b) 0.3Zn, (c) 0.7Zn

Fig. 10 Typical sectional corrosion morphologies of Al-2.8Cu-1.7Li(wt%) alloy with different Zn additions aged at 175 °C for 6 h and 24 h after 6 h exposure in intergranular corrosion medium^[47]: (a) Zn-free, (b) 0.3Zn, (c) 0.7Zn

然而,当合金中 Cu/Li 含量比比较高时,晶界和晶内析出 T₁ 相较多,对 T₁ 相边缘基体阳极溶解的促进作用仍然很强烈,因而在 Cu/Li 含量比高的铝锂合金中添加 Zn 元素时提高耐腐蚀能力有限^[49]。

与上述机理相关的 2099 铝锂合金(添加 Zn 元素的中等 Cu/Li 含量比的铝锂合金)具有卓越的耐腐蚀能力。图 11 为 2099 铝锂合金与另外两种传统铝合金在海边暴露不同时间后的形貌照片,2024-T3 铝合金仅暴露 1 年后即发生严重的剥落腐蚀,而 2099-T8 铝锂合金暴露约 20 年后仍然只发生孔蚀^[1, 50]。2099 铝锂合金目前已在国产大飞机 C919 构件上成功应用。

3.3 耐损伤铝锂合金

设计以细小弥散 δ' 相为主要强化相,而其他强化相很少的铝锂合金,是开发耐损伤铝锂合金的主要方向之一。国内研究人员设计了成分为 Al-1.7Li-1.5Cu-0.9Mg-0.1Zr-0.08Sc 的铝锂合金,结合不同 T8 双级时效(6%冷轧预变形,150 °C/4 h+170 °C/(2~120) h),获得了耐损

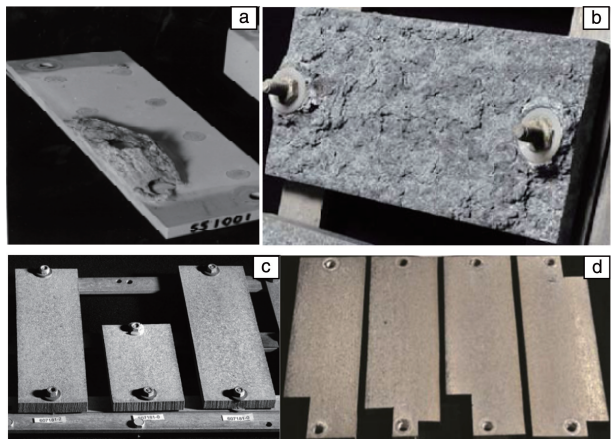


图 11 不同铝合金海边暴露不同时间后形貌照片^[1, 50]: (a) 7150-T6, 4 年; (b) 2024-T3, 1 年; (c) 2099-T8, 14 年; (d) 2099-T8, 19.1 年

Fig. 11 Morphologies of Al alloys after seaside exposure for different time^[1, 50]: (a) 7150-T6, 4 years; (b) 2024-T3, 1 year; (c) 2099-T8, 14 years; (d) 2099-T8, 19.1 years

伤性能优异的铝锂合金薄板^[51]。图 12 为该铝锂合金不同 T8 时效状态的微观组织^[51], 析出相均以 δ' 相为主, 只是随第二级时效时间延长, δ' 相逐渐长大。合金中心裂纹试样 (MT 试样) 的疲劳裂纹扩展速率曲线如图 13 所示, 具体性能值如表 4 所列^[51]。由此可知, 该铝锂合金是一种性能优异的中强耐损伤铝锂合金, 在航空构件上有良好的应用前景。

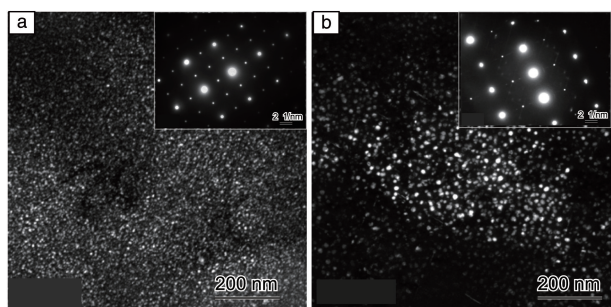


图 12 一种中强耐损伤铝锂合金不同 T8 双级时效后的 SAED 图谱及 TEM-DF 照片^[51]: (a) 第二级 170 °C/2 h, (b) 第二级 170 °C/24 h

Fig. 12 SAED patterns and TEM-DF images of a novel medium strength and highly tolerant Al-Li alloy after different two-step T8 aging^[51]: (a) 2nd step aging is 170 °C/2 h, (b) 2nd step aging is 170 °C/24 h

设计以细小 T_1 相为主要强化相的铝锂合金是耐损伤铝锂合金发展的另一方向。中南大学设计了一种成分为 Al-2.98Cu-0.85Li-0.37Mg-0.32Ag 的铝锂合金, 薄板经 T8

表 4 一种中强耐损伤铝锂合金不同 T8 双级时效后力学性能和疲劳裂纹扩展速率^[51]

Table 4 Mechanical properties and fatigue crack propagation rates of a novel medium strength and highly tolerant Al-Li alloy after different two-step T8 aging^[51]

Second aging#	YS/MPa	UTS/MPa	EL/%	da/dN^* (mm · cycle ⁻¹)
170 °C/2 h	370.2	458.2	11.7	1.08×10^{-3}
170 °C/24 h	432.3	509.6	9.2	2.12×10^{-3}
170 °C/120 h	487.1	535.4	7.8	5.09×10^{-3}

notes that the pre-deformation for T8 aging is 6%, and the 1st step aging is at 150 °C for 4 h; * notes $\Delta K = 30 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$

双级时效 (12%冷轧预变形+RT/120 h+145 °C/20 h) 后析出尺寸非常细小且弥散分布的 T_1 相 (图 13a), 获得良好的综合性能: 抗拉强度 443 MPa, 屈服强度 397 MPa, 伸长率 16.5%, 裂纹扩展速率约 $1.34 \times 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{cycle}^{-1}$ ($\Delta K = 30 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)。但因该合金 Cu 和 Li 含量比例特征适宜于形成 $T_1 + \theta'$ 的析出相类型, 若热处理控制不当, 容易形成尺寸较大的 $T_1 + \theta'$ 相以及极少量 S' 相 (图 13b 和 13c), 结果在常规力学性能基本不变的条件下, 其耐损伤性能显著下降 (图 14a)^[52, 53]。

另一种比较典型的耐损伤铝锂合金 2060 由 Alcoa 公司设计开发, 目前在国产大飞机 C919 机身等直段上应用 (图 2a)^[16], 其疲劳裂纹扩展速率曲线如图 14b 所示^[54]。

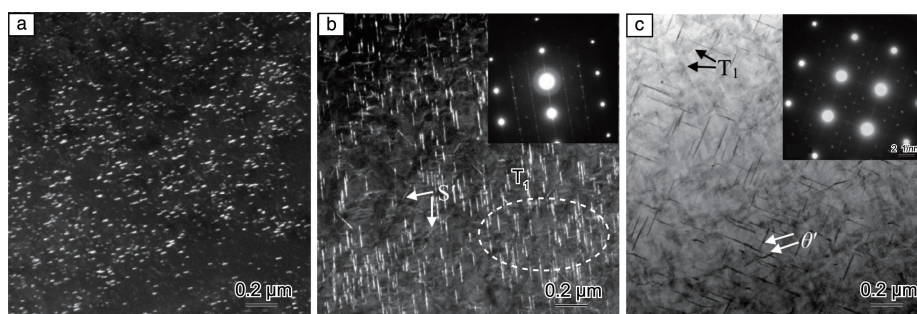


图 13 Al-2.98Cu-0.85Li-0.37Mg-0.32Ag 合金不同时效处理后的 TEM 照片^[52]: (a) T8 双级时效 (12%预变形+RT/120 h+145 °C/20 h), T_1 相, DF; (b) T8 单级时效 (4%预变形+145 °C/45 h), T_1 相, DF; (c) T8 单级时效, θ' 相, 明场 (bright field, BF) 像

Fig. 13 TEM images of Al-2.98Cu-0.85Li-0.37Mg-0.32Ag alloy after different aging^[52]: (a) T8 two-step aging (12% pre-deformation+RT/120 h+145 °C/20 h), T_1 , DF; (b) T8 single-step aging (4% pre-deformation+145 °C/45 h), T_1 , DF; (c) T8 single-step aging, θ' , BF

3.4 高淬透性铝锂合金

高淬透性、低淬火敏感性主要在 7XXX 系铝合金中有较多报道。随着航空航天应用对厚截面铝锂合金构件的需求, 国内逐渐提出了开发高淬透性铝锂合金的目标。目前对铝锂合金的淬透性评价非常少, 仅俄罗斯对部分铝锂合金淬透性或过饱和固溶体的稳定性进行过研究。Shneider 等采用端淬结合后续时效后进行强度测试

的方法, 研究了 1420、1421、1450、1460、1470 等几种铝锂合金的淬透性 (部分结果如图 15 所示)^[55]。结果认为: Cu 含量提高, 过饱和固溶体稳定性下降; 合金中 Cu/Li 含量比降低, 铝锂合金淬透性提高。然而, 他们并未系统研究合金化元素对铝锂合金淬透性的影响, 因而上结论不能对高淬透性铝锂合金的开发提供有效指导。

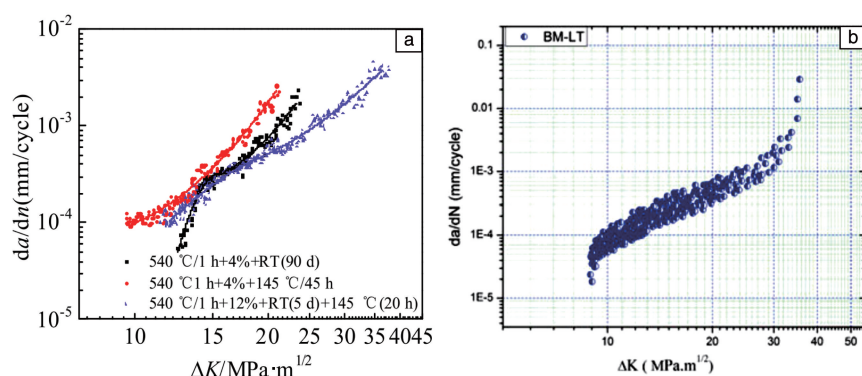


图 14 不同铝锂合金疲劳裂纹扩展速率曲线^[52-54]: (a) Al-2.98Cu-0.85Li-X 合金, (b) 2060-T8 铝锂合金

Fig. 14 Fatigue crack propagation rate curves of different Al-Li alloys^[52-54]: (a) Al-2.98Cu-0.85Li-X alloy, (b) 2060-T8 (LT specimen)

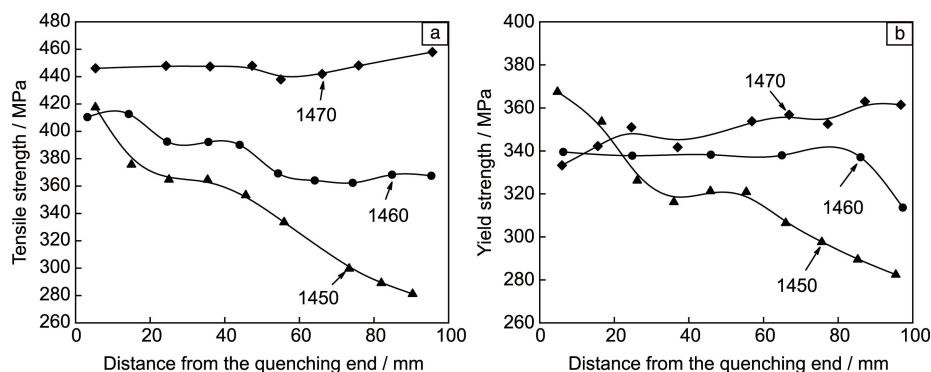


图 15 不同铝锂合金端淬并时效后距淬火端不同距离处试样的平均强度^[55]: (a) 抗拉强度, (b) 屈服强度

Fig. 15 Average strength as a function of distance away from the quenching end after end quenching and artificial aging^[55]: (a) tensile strength, (b) yield strength

国内设计了一种采用薄板叠层、端淬、后续 T8 时效 (针对 Al-Cu-Li 系铝锂合金的热处理工艺) 再进行强度测试来表征铝锂合金淬透性的方法^[56], 并将其应用于表征第三代铝锂合金 2195、2050 及 2060 的淬透性, 如图 16 所示^[57-61]。由图可知, 2050 铝锂合金淬透性最好, 而 2060 铝锂合金淬透性最差, 这个结果与上述铝锂合金 AMS 规范的厚度规格相符^[62, 63]。

针对开发高淬透性铝锂合金的目标, 作者课题组正在针对 Al-Cu-Li 系铝锂合金成分特征, 在实验室制备不同成分铝锂合金薄板的基础上, 对大范围内 Cu, Li, Mg 等几种主要合金化元素对铝锂合金淬透性的影响进行研究。目前部分研究结果已申请高强高淬透性铝锂合金专利^[64], 并拟陆续申请其他类型高淬透性铝锂合金专利。

4 结 语

我国是世界上能工业化生产和应用先进铝锂合金的少数几个国家之一, 突破了铝锂合金工程化研制与生产中的一些关键技术, 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。与此同时, 我国科研

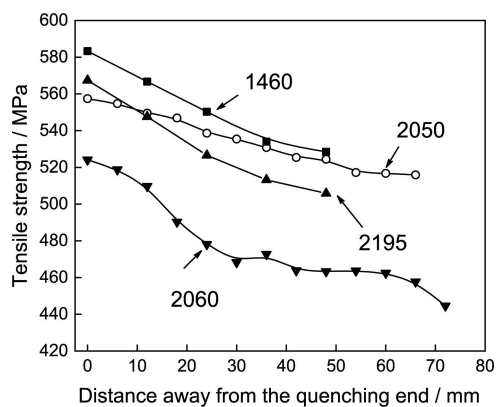


图 16 不同铝锂合金端淬并 T8 时效后距淬火端不同距离处试样的抗拉强度^[57-61]

Fig. 16 Average tensile strength as a function of distance away from the quenching end after end quenching and T8 aging^[57-61]

人员对铝锂合金的合金成分设计、加工变形、热处理、腐蚀等方面的基础理论问题也进行了深入系统的研究。

我国铝锂合金研究虽然取得了很大成绩, 但在铝锂合金自主研发设计方面仍然落后于国外先进水平。主要

表现在: ① 自主设计、注册的铝锂合金牌号太少, 目前仅有 2A97、2A55、X2A66、X2A68、2A60 铝锂合金牌号; ② 自主知识产权保护不足, 而美国(如 Alcoa)等则抢先在中国进行专利保护; ③ 大量自主设计的不同高性能铝锂合金未进入工业化试制和工业化生产阶段, 不能作为航空航天部门的备选材料而开展应用技术研究。

作者认为, 未来我国应针对航空航天技术发展的需求, 进一步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(包括高强超高强、耐腐蚀、耐损伤、可焊、高成形性、高淬透性)铝锂合金的设计思路和设计准则, 进一步研发具有自主知识产权的新型高性能铝锂合金, 建立相应的材料规范, 同时加快自主研发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, 我国新型铝锂合金的研究、生产和应用必将进入一个发展新时期。

参考文献 References

- [1] RIOJA R J, LIU J. Metallurgical and Materials Transactions A[J], 2012, 43(9): 3325-3337.
- [2] PRASAD N E, GOKHALE A A, WANHILL R J H. Aluminum-Lithium Alloys: Processing, Properties, and Applications[M]. Kidlington, USA: Butterworth-Heinemann, 2014: 51.
- [3] DENZER D K, RIOJA R J, BRAY G H, *et al.* The Evolution of Plate and Extruded Products with High Strength and Fracture Toughness [C]// Proceedings of the 13th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA13). Pittsburgh, USA: TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2012: 587-592.
- [4] 李劲风, 陈永来, 马云龙, 等. 宇航材料工艺[J], 2021, 51(4): 37-47.
LI J F, CHEN Y L, MA Y L, *et al.* Aerospace Materials and Technology[J], 2021, 51(4): 37-47.
- [5] 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.
- [6] 王雷, 王惠苗, 马方园, 等. 焊接[J], 2019(3): 24-27.
WANG L, WANG H M, MA F Y, *et al.* Welding and Joining[J], 2019(3): 24-27.
- [7] 宋建岭, 王昆, 李超, 等. 导弹与航天运载技术[J], 2020(4): 102-106.
SONG J L, WANG K, LI C, *et al.* Missiles and Space Vehicles[J], 2020(4): 102-106.
- [8] 温斯涵, 周炼刚, 孙建秋, 等. 宇航材料工艺[J], 2021, 51(4): 131-135.
WEN S H, ZHOU L G, SUN J Q, *et al.* Aerospace Materials and Technology[J], 2021, 51(4): 131-135.
- [9] 罗传光, 李恒, 徐光霁, 等. 焊接学报[J], 2021, 42(1): 8-15.
LUO C G, LI H, XU G P, *et al.* Transactions of the China Welding Institution[J], 2021, 42(1): 8-15.
- [10] 温涛, 陈永来, 杜玥, 等. 载人航天[J], 2020, 26(6): 717-722.
WEN T, CHEN Y L, DU Y, *et al.* Manned Spaceflight[J], 2020, 26(6): 717-722.
- [11] 陈永来, 温涛, 朱宏伟, 等. 航天制造技术[J], 2019(1): 17-21.
CHEN Y L, WEN T, ZHU H W, *et al.* Aerospace Manufacturing Technology[J], 2019(1): 17-21.
- [12] LIU Z Z, LI J F, LIU D Y, *et al.* Journal of Materials Research and Technology[J], 2021, 11: 1806-1815.
- [13] LI J F, YE Z H, LIU D Y, *et al.* Acta Metallurgica Sinica (English Letters)[J], 2017, 30(2): 133-145.
- [14] LI Y, XU G F, PENG X Y, *et al.* Journal of Alloys and Compounds [J], 2022, 906: 163977.
- [15] DONG F, HUANG S Q, YI Y P, *et al.* Materials Science and Engineering: A[J], 2022, 834: 142585.
- [16] 郑子樵, 李劲风, 陈志国, 等. 中国有色金属学报[J], 2011, 21(10): 2337-2351.
ZHENG Z Q, LI J F, CHEN Z G, *et al.* The Chinese Journal of Non-ferrous Metals[J], 2011, 21(10): 2337-2351.
- [17] 李劲风, 宁红, 刘丹阳, 等. 中国有色金属学报[J], 2021, 31(2): 258-279.
LI J F, NING H, LIU D Y, *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J], 2021, 31(2): 258-279.
- [18] WANG S C, STARINK M J. International Materials Reviews [J], 2005, 50(4): 193-215.
- [19] LV K X, ZHU C Y, ZHENG J X, *et al.* Journal of Materials Research [J], 2019, 34(20): 3535-3544.
- [20] HUANG J C, ARDELL A J. Materials Science and Technology[J], 1987, 3: 176-188.
- [21] 韩焯. 1441 铝锂合金时效工艺及其微观组织与性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
HAN Y. Study of the Heat Treatment and Alloying Elements on the Microstructures and Mechanical Properties of 1441 Al-Li Alloy [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [22] ZENG G J, NING H, DENG S X, *et al.* Advanced Engineering Materials[J], 2022, 24(9): 2200033.
- [23] GHOSH K S, DAS K, CHATTERJEE U K. Metallurgical and Materials Transactions A[J], 2004, 35(12): 3681-3691.
- [24] BALDUCCI E, CESCHINI L, MESSIERI S, *et al.* Materials Science and Engineering: A[J], 2017, 707: 221-231.
- [25] KIM H J, NIINOMI M. Materials Science and Engineering: A[J], 2000, 284: 14-24.
- [26] NIE J F, MUDDLE B C. Materials Science and Engineering: A[J], 2001, 319-321: 448-451.
- [27] NIE J F, MUDDLE B C, POLMEAR I J. Materials Science Forum [J], 1996, 217-222: 1257-1262.

- [28] NIE J F, MUDDLE B C. Journal of Phase Equilibria[J], 1998, 19 (6): 543-551.
- [29] LI J F, ZHENG Z Q, LI S C, *et al.* Transactions of Nonferrous Metals Society of China[J], 2006, 16(6): 1268-1273.
- [30] LI J F, ZHENG Z Q, LI S C, *et al.* Corrosion Science[J], 2007, 49 (6): 2436-2449.
- [31] KERTZ J E, GOUMA P I, BUCHHEIT R G. Metallurgical and Materials Transactions A[J], 2001, 32(10): 2561-2573.
- [32] LI J F, LI C X, PENG Z W, *et al.* Journal of Alloys and Compounds [J], 2008, 460: 688-693.
- [33] LIU D Y, LI J F, LIN Y C, *et al.* Acta Metallurgica Sinica (English Letters)[J], 2020, 33(9): 1201-1216.
- [34] 薛喜丽, 郑子樵, 胡芳, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2016, 45 (12): 3319-3324.
XUE X L, ZHENG Z Q, HU F, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2016, 45(12): 3319-3324.
- [35] 薛喜丽. 2A97 铝锂合金薄板微观组织和性能的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2015.
XUE X L. Microstructure and Properties of 2A97 Al-Li Alloy Sheet [D]. Changsha: Central South University, 2015.
- [36] DE P S, MISHRA R S, BAUMANN J A. Acta Materialia[J], 2011, 15(59): 5946-5960.
- [37] LI J F, LIU P L, CHEN Y L, *et al.* Transactions of Nonferrous Metals Society of China[J], 2015, 25(7): 2103-2112.
- [38] 李劲风, 陈永来, 张绪虎, 等. 宇航材料工艺[J], 2015, 45(2): 24-28.
LI J F, CHEN Y L, ZHANG X H, *et al.* Aerospace Materials and Technology[J], 2015, 45(2): 24-28.
- [39] 潘波, 李睿, 李劲风, 等. 材料研究与应用[J], 2017, 11(3): 146-152.
PAN B, LI R, LI J F, *et al.* Materials Research and Application[J], 2017, 11(3): 146-152.
- [40] 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.
- [41] HUANG B P, ZHENG Z Q. Acta Materialia[J], 1998, 46(12): 4381-4393.
- [42] 王瑞琴, 郑子樵, 陈圆圆, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2009, 38 (4): 622-626.
WANG R Q, ZHENG Z Q, CHEN Y Y, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2009, 38(4): 622-626.
- [43] 魏修宇, 郑子樵, 余玲娟, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2010, 39 (9): 1583-1587.
WEI X Y, ZHENG Z Q, SHE L J, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2010, 39(9): 1583-1587.
- [44] 朱小辉, 郑子樵, 钟申. 中国有色金属学报[J], 2010, 20(10): 1861-1867.
ZHU X H, ZHENG Z Q, ZHONG S. The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J], 2010, 20(10): 1861-1867.
- [45] 罗先甫, 郑子樵, 钟继发, 等. 中国有色金属学报[J], 2013, 23 (7): 1833-1842.
LUO X F, ZHENG Z Q, ZHONG J F, *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J], 2013, 23(7): 1833-1842.
- [46] 李劲风, 陈永来, 张绪虎, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2017, 46 (12): 3715-3720.
LI J F, CHEN Y L, ZHANG X H, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2017, 46(12): 3715-3720.
- [47] LIU D Y, LI J F, MA Y L, *et al.* Corrosion Science[J], 2018, 145: 220-231.
- [48] LI J F, XU L, CAI C, *et al.* Metallurgical and Materials Transactions A[J], 2014, 45(12): 5736-5748.
- [49] LI J F, BIRBILIS N, LIU D Y, *et al.* Corrosion Science[J], 2016, 105: 44-57.
- [50] JAMES P M, FRANCINE S B, JAMES D C, *et al.* Improvements in Corrosion Resistance Offered by Newer Generation 2x99 Aluminum-Lithium Alloys for Aerospace Applications[C]//Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys. Yokohama, Japan; The Japan Institute of Light Metals, 2010; 1492-1497.
- [51] 桑冯建. 1445 铝锂合金力学、腐蚀性能与微观组织关系的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2017.
SANG F J. Research on the Relationship between the Microstructure and the Mechanical or Corrosion Property of 1445 Al-Li Alloy[D]. Changsha: Central South University, 2017.
- [52] 胡芳, 郑子樵, 钟继发, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2017, 46 (7): 1989-1993.
HU F, ZHENG Z Q, ZHONG J F, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2017, 46(7): 1989-1993.
- [53] 钟继发. 耐损伤铝合金成分设计及裂纹扩展行为研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
ZHONG J F. Design of Aluminum Alloys with High Resistance to Damage and Its Fatigue Crack Propagation[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [54] AKHTAR N, WU S J. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures[J], 2017, 40: 233-244.
- [55] SHNEIDER G L, DRITS A M. Metal Science and Heat Treatment[J], 1995, 37(9/10): 373-377.
- [56] 李劲风, 刘丹阳, 郑子樵. 一种测试金属淬透性的方法: ZL 201710225016.6[P]. 2018-06-15
LI J F, LIU D Y, ZHENG Z Q. A Method for Alloy Hardenability Measurement; ZL 201710225016.6[P]. 2018-06-15.
- [57] LI J F, LIU D Y, NING H, *et al.* Materials Characterization[J], 2018, 137: 180-188.
- [58] 刘晨, 李劲风, 宁红, 等. 中国有色金属学报[J], 2019, 29(11): 2451-2458.
LIU C, LI J F, NING H, *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J], 2019, 29(11): 2451-2458.

- [59] LU D D, NING H, DU Y, *et al.* Journal of Alloys and Compounds [J], 2021, 888: 161450.
- [60] 刘晨. 2050 和 2060 铝锂合金淬火敏感性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2019.
- LIU C. Study on Quench Sensitivity of 2050 and 2060 Al-Li Alloy[D]. Changsha: Central South University, 2019.
- [61] LIU D Y, LI J F, LIU C, *et al.* Materials Characterization[J], 2021, 177: 111156.
- [62] SAE International Group. Aluminum Alloy Plate 4.0Cu-1.0Li-0.40Mg-0.35Ag-0.13Zr (2195-T34), Solution Heat Treated and Stress Relieved; Aerospace Material Specification SAE AMS4472[S]. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2011.
- [63] SAE International Group. Aluminum Alloy Plate 3.5Cu-1.0Li-0.40Mg-0.35Mn-0.45Ag-0.12Zr (2050-T84) Solution Heat Treated, Stress Relieved, and Artificially Aged; Aerospace Material Specification SAE AMS4413[S]. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2007.
- [64] 李劲风, 宁红, 刘添乐, 等. 一种高强度高淬透性铝锂合金及其制备方法; 202111552346.9[P]. 2021-12-18.
- LI J F, NING H, LIU T L, *et al.* A High Strength and High Hardenability Al-Li Alloy and Its Fabrication Method; 202111552346.9[P]. 2021-12-18.

(编辑 惠 琼)



专栏特约编辑戴圣龙



特约撰稿人黄 晖



特约撰稿人赵丕植



特约撰稿人李劲风

戴圣龙: 男, 1966 年生, 北京航空材料研究院院长、研究员, 国家新材料产业发展咨询委员会委员, 国防科工局军工配套领域专家组成员, 军委科技委某领域专家组成员, 军委装备部材料标技委主任, 中国金属学会、中国材料研究学会、中国航空学会常务理事。长期致力于航空铝合金研制与应用研究, 主持自然科学基金项目、国家“973”计划项目、国家重点研发计划项目、国防科研及型号研制项目等 60 余

项, 系统开展了第三代航空铝合金国产化研制、第四代航空铝合金自主研发与应用研究、超大规模高性能铝合金锻件和厚板研制与应用研究、第五代航空铝合金研制。获国家科技进步二等奖 1 项、国防科技进步一等奖 3 项、航空科技进步一等奖 1 项, 获“冯如航空科技精英奖”, 获授权发明专利 80 余项, 撰写著作 9 本, 发表论文 170 余篇。

黄 晖: 男, 1970 年生, 北京工业大学材料与制造学部先进铝合金

研究所所长, 研究员、博士生导师。主要从事新型铝合金及加工技术研究工作, 包括先进军用铝合金、高技术民用铝合金、铝合金微合金化技术、弥散强化技术及先进加工技术, 作为负责人主持了国家重点研发计划项目、国家“863”计划课题、国家自然科学基金项目、国防军工项目等国家级项目 10 余项。获国防工业科技进步三等奖、省级国防工业科技进步二等奖、船舶工业科技进步三等奖等国家及省部级奖励;

已发表学术论文 80 余篇, 申请和授权专利 50 余项, 主持专利转让 10 余项。

赵丕植: 男, 1963 年生, 中铝材料应用研究院有限公司教授、博士生导师。从事交通运输、新能源、包装、海洋工程及电子工业等领域的新材料及应用技术的研发工作长达 30 年。申请发明专利 100 余项, 发表论文 50 余篇, 制定国家标准 2 项。获 2016 年全国有色金属标委会一等奖, 获中国有色金属工业科学技术奖 4 项,

获日本轻金属学会跃进奖、日本材料研究学会新技术及新产品奖。

李劲风: 男, 1971 年生, 中南大学材料科学与工程学院教授、博士生导师、副院长, 中国腐蚀电化学与测试方法专业委员会委员。长期致力于铝锂合金的(微)合金化理论、热处理工艺研究以及新型高性能铝锂合金的开发。先后主持并承担了国家自然科学基金项目、国家留学回国基金项目、国家 JP 配套项目、载人航天项目、航天运载火箭贮箱材料预研等项目。已在 *Corrosion Science*, *Materials Science and Engineering A*, *Journal of Alloys and Compounds*, *Materials Characterization* 等国内外知名学术刊物及国际学术会议发表学术论文 160 余篇。