

航空航天用 Al-Li 合金强韧化研究进展

管庆开¹ 姜云¹ 林波¹ 杨明²

(1. 贵州大学机械工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学材料与冶金学院, 贵阳 550025)

摘要 Al-Li 合金因其在实现航空航天领域结构件的轻量化生产中的卓越表现而备受关注。回顾了国内外 Al-Li 合金的研发历程, 介绍了其在航空航天领域的实际应用概况。总结了 Al-Li 合金的主要制备技术, 并深入探讨了微合金化技术、形变热处理技术和表面改性技术对 Al-Li 合金力学性能的影响, 分析了 Al-Li 合金对应的强化机制。最后, 对 Al-Li 合金的强韧化研究进行了展望。

关键词 Al-Li 合金; 制备技术; 微合金化; 形变热处理

中图分类号 TG146.21; TG146.26⁺3

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20240550

Research Progress in Strengthening and Toughening of Al-Li Alloys for Aerospace Applications

GUAN Qingkai¹, JIANG Yun¹, LIN Bo¹, YANG Ming²

(1. School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025; 2. School of Materials and Metallurgy, Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract: Al-Li alloys have attracted much attention due to the excellent performance in achieving lightweight production of structural components in the aerospace field. The development history of Al-Li alloys at home and abroad was reviewed, and practical applications in the aerospace field were introduced. The main preparation techniques for Al-Li alloys were summarized, and influence of microalloying technology, thermo-mechanical treatment technology and surface modification technology on mechanical properties of Al-Li alloys was deeply explored, and the related strengthening mechanisms were described. Finally, the research on strengthening and toughening of Al-Li alloys was prospected.

Key Words: Al-Li Alloy, Preparation Technology, Microalloying, Thermo-mechanical Treatment

Li 的密度仅为 0.534 g/cm³, 是自然界中密度最低的金属元素。含有 Li 元素的铝合金被称为 Al-Li 合金。Al-Li 合金与钢、钛合金、镍基合金等相比具有低密度、高弹性模量、高比强度、高比刚度等特性, 并且在大气层与太空环境中均具有较高的抗疲劳性, 因而在航空航天等领域得到了广泛应用^[1]。研究表明, Al 合金中每添加 1% 的 Li 即可使合金整体密度降低 3%, 弹性模量增加 6%^[2], 但其强度与 2026、7075 这类传统铝合金材料相当。此外, 若使用 Al-Li 合金代替常规商用 Al 合金可使得结构件质量减轻 10%~20%, 刚度提升 15%~20%^[3]。因此, 针对 Al-Li 合金的研究虽历经百年, 仍方兴未艾。为进一步适应航空航天构件越来越高的性能要求, 对 Al-Li 合金的强韧性的要求也越来越高。目前, 针对 Al-Li 合金提升强韧性的研究主要集中

于合金成分控制、热变形及热处理工艺等方面。有不少研究者据此进行了提升 Al-Li 合金强韧性的分析, 为综合了解和应用 Al-Li 合金提供了有效途径。邝泉波等^[4]总结了合金成分优化、热变形及热处理对 Al-Li 合金强度和塑性的影响。刘志鹏等^[5]提出微合金化和形变热处理是制备高强高韧 Al-Li 合金最有潜力的工艺方案。与此同时, 表面改性技术作为一种有效提升材料性能的手段在 Al-Li 合金中的应用受到了越来越多的关注。

本研究在概括 Al-Li 合金的发展与应用, 归纳总结 Al-Li 合金的强韧化机制的基础上, 总结 Al-Li 合金的主要制备技术, 重点分析微合金化、形变热处理尤其是表面改性技术对 Al-Li 合金的微观组织和力学性能的影响规律与强化机制, 以期对 Al-Li 合金的开发提供参

收稿日期: 2024-12-31; 修订日期: 2025-02-14

基金项目: 贵州省自然科学基金资助项目(ZK[2021054]); 贵州省教育厅“百校千企科技攻关揭榜挂帅”项目(黔教技[2024]002 号); 贵州省科技计划资助项目(黔科合支撑[2024]一般 039)

第一作者简介: 管庆开, 男, 2000 年出生, 硕士研究生, E-mail: 15318671248@163.com

通信作者: 姜云, 女, 1979 年出生, 副教授, E-mail: j_yun7907@163.com

引用格式: 管庆开, 姜云, 林波, 等. 航空航天用 Al-Li 合金强韧化研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(6): 842-857.

GUAN Q K, JIANG Y, LIN B, et al. Research progress in strengthening and toughening of Al-Li alloys for aerospace applications[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(6): 842-857.

考与借鉴。

1 Al-Li 合金研究发展现状与应用

自 1924 年第一个含有 Li 的铝合金诞生以来,研究者对 Al-Li 合金的研发已有百年历史。时至今日,Al-Li 合金的研发历程共经历了 4 个阶段。

第一代 Al-Li 合金的出现以 1924 年德国成功研制含有 0.1% 的 Li 的铝锂合金为标志,以 1957 年美国 Alcoa 公司成功研制含有 1% 的 Li 的 2020Al-Li 合金 (Al-4.5Cu-1.0Li-0.8Mn-0.5Cd) 为代表。但第一代 Al-Li 合金存在明显缺陷,其塑韧性较低,难以满足航空航天领域严苛的力学性能标准,导致其未能在相关领域广泛推行和应用。第二代 Al-Li 合金是 20 世纪 70~80 年代逐渐发展起来的。在第一代 Al-Li 合金的

基础上,显著提升了 Li 的含量,其密度也随之降低。这意味着第二代 Al-Li 合金的密度更低,弹性模量更高。第二代 Al-Li 合金虽然有效解决了第一所存在的缺陷,但其各向异性严重,强度水平总体较低,亦无法满足高性能航空航天构件的使用需求。第三代 Al-Li 合金发展于 20 世纪 90 年代以后,其在降低了 Li 含量的同时增加了 Cu 的含量,并且添加了 Ag、Mn、Zn 等微量金属元素来优化性能,从而有效改善了 Al-Li 合金的性能,在降低 Al-Li 合金的各向异性和提高其可焊性方面尤为突出^[6-7]。2009 年,Airbus 公司首次提出第四代 Al-Li 合金的概念。将 Li 含量进一步降低,调整了 Cu、Li 的含量和比例,并进行多元微合金化处理。但是由于知识产权保护,其具体成分并未公开。

国外 Al-Li 合金的具体牌号及其在航空航天领域的应用总结见表 1 和表 2。

表 1 国外 Al-Li 合金牌号及代际演变^[8-10]

Tab.1 Grades and generational evolutions of domestic and overseas Al-Li alloy^[8-10]

阶段	合金	$w_B/\%$									微量元素	Al	密度/ ($g\cdot cm^{-3}$)
		Cu	Li	Mg	Zn	Mn	Zr	Fe	Si	Ag			
第一代	2020	4.5	1.2	—	—	0.8	—	0.3 ^m	0.2 ^m	—	0.6(Cd)	余量	2.71
	BAД23	4.5~5.8	0.9~1.4	—	—	0.5	0.11	0.15 ^m	0.1 ^m	—	—	余量	2.72
第二代	1420	—	2.1	5.2	—	—	0.11	0.2 ^m	0.15 ^m	—	—	余量	2.74
	1421	—	2.1	5.2	—	—	—	0.15 ^m	0.1 ^m	—	0.1~0.2(Sc)	余量	2.74
	1441	2.0	1.9	0.9	—	—	0.09	0.11	0.05	—	—	余量	2.59
	2090	2.7	2.1	—	—	—	0.11	0.12 ^m	0.1 ^m	—	—	余量	2.59
	8090	1.2	2.4	0.8	—	—	0.12	0.10 ^m	0.1 ^m	—	—	余量	2.57
	1430	1.4~1.8	1.5~1.9	2.3~3.0	—	—	0.11	0.15 ^m	0.1 ^m	—	—	余量	2.57
	1450	2.9	2.1	—	—	—	0.11	0.05 ^m	0.1 ^m	—	—	余量	2.60
	1423	—	2.1	3.7	—	—	0.08	0.20 ^m	0.15 ^m	—	0.1~0.2(Sc)	余量	—
	1440	1.5	2.4	0.8	—	—	0.11	0.15 ^m	0.1 ^m	—	—	余量	2.55
	2091	2.0	2.0	1.3	—	—	0.11	0.30 ^m	0.2 ^m	—	—	余量	2.58
	8091	1.9	2.6	0.8	—	—	0.12	0.30 ^m	0.2 ^m	—	—	余量	2.54
	1460	2.6~3.3	2.0~4.4	0.05	—	—	0.11	0.15 ^m	0.1 ^m	—	0.05~0.14(Sc), 0.06(Ti)	余量	2.60
	2094	4.8	1.3	0.4	—	—	0.11	0.15 ^m	0.12 ^m	0.4	—	余量	—
	2095	4.3	1.3	0.4	—	—	0.1	0.15 ^m	0.12 ^m	0.4	—	余量	—
	2096	2.3~3.0	1.3~1.9	0.25~0.8	—	—	0.14	0.15 ^m	0.12 ^m	0.25~0.6	—	余量	—
	2097	2.5~3.1	1.2~1.8	0.35 ^m	0.35 ^m	0.35	0.08~0.16	0.15 ^m	0.12 ^m	—	0.15(Ti)	余量	—
	2098	3.2~3.8	0.8~1.3	0.25~0.8	0.35 ^m	0.35	0.04~0.18	0.15 ^m	0.12 ^m	—	0.1(Ti)	余量	2.70
	2099	2.4~3.1	1.6~2.0	0.1~0.5	0.4~1.0	0.1~0.5	0.009	0.07	0.15	—	0.1(Ti), 0.000 1(Be)	余量	2.63
	2050	2.9~3.2	0.7~1.3	0.2~0.6	0.25	0.2~0.5	0.06~0.14	0.1 ^m	0.1 ^m	0.2~0.7	0.05(Ni),0.05 (Cr),0.05(Ga), 0.05(V)	余量	2.70
第三代	AF/C489	2.7	2.1	0.3	0.6	0.3	0.05	0.1 ^m	0.1 ^m	—	—	余量	—
	AF/C458	2.7	1.8	0.3	0.6	0.3	0.08	0.1 ^m	0.1 ^m	—	—	余量	—
	2195	3.7~4.3	0.8~1.2	0.25~0.80	0.25 ^m	0.25	0.08~0.16	0.15 ^m	0.12 ^m	0.25~0.6	0.1Ti	余量	2.71
	2196	2.5~3.3	1.4~2.1	0.25~0.80	0.35	0.35	0.04~0.18	0.15 ^m	0.12 ^m	0.25~0.6	—	余量	2.63
	2197	2.5~3.1	1.3~1.7	0.25	0.05	0.1~0.5	0.08~0.15	0.1 ^m	0.1 ^m	—	—	余量	2.65
	2198	2.9~3.5	0.8~1.1	0.25~0.80	0.10	0.5	0.04~0.18	0.1 ^m	0.08 ^m	0.1~0.5	0.05Cr	余量	2.69
	2199	2.3~2.9	1.4~1.8	0.05~0.40	0.2~0.9	0.1~0.5	0.05~0.12	0.07	0.05	—	0.0001Be	余量	2.64
	2297	2.5~3.1	1.1~1.7	0.25	0.05	0.1~0.5	0.08~0.15	0.1 ^m	0.1 ^m	—	—	余量	2.65
	2296	2.45	1.6	0.6	0.25 ^m	0.28	0.11	—	—	0.43	—	余量	2.63
	Welda- lite049	2.3~5.2	0.7~1.8	0.25~0.80	—	—	0.25~0.80	—	—	—	—	余量	—
	Welda- lite210	4.5	1.3	0.4	—	—	0.4	—	—	0.5	—	余量	—

续表

阶段	合金	$w_B/\%$										Al	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^3$)
		Cu	Li	Mg	Zn	Mn	Zr	Fe	Si	Ag	微量元素		
第四代	2060	3.96	0.75	0.85	0.4	0.3	0.11	—	—	0.25	—	余量	2.72
	2065	3.8~4.7	0.5~1.5	0.25~0.8	≤ 0.3	0.15~0.5	0.05~0.15	0.1	0.1	0.15~0.5	0.1Ti	余量	2.70
	X2A66	3.5~4.1	1.3~1.8	0.2~0.6	0.2~0.8	0.2~0.6	0.08~0.16	0.1 ^m	0.1 ^m	—	0.1 ^m Ti	余量	2.65
	2071	3.7~4.5	0.8~1.4	0.7~1.4	0.2	0.1~0.5	0.05~0.15	0.15	0.12	0.15	—	余量	—
	2075	4.1~4.6	0.7~0.11	0.3~0.8	0.2	0.1	0.08~0.16	0.1	0.1	0.1~0.3	—	余量	—
	2074	2.6~3.3	0.6~0.9	0.3~0.7	0.1~0.6	0.1~0.5	—	0.1	0.1	0.05~0.3	—	余量	—
	2076	2.35	1.5	0.5	0.3 ^m	0.33	0.11	—	—	0.28	—	余量	2.64
	2055	3.2~4.2	1.0~1.3	0.2~0.6	0.3~0.7	0.1~0.5	0.05~0.15	0.1	≤ 0.07	0.2~0.7	—	余量	2.70
	2295	3.6~4.5	0.9~1.3	0.25~0.8	0.25	0.1	0.05~0.15	0.08	0.08	0.1~0.5	—	余量	—
	2395	3.6~4.5	0.9~1.4	0.25~0.8	0.25	0.35	0.1	0.1	0.8	0.1~0.45	—	余量	—
	2085	2.2~2.7	1.3~1.9	0.3~0.8	0.2	0.1	0.08~0.16	0.1	0.1	0.1~0.4	—	余量	—

表 2 Al-Li 合金在航天航空领域的主要应用及特点简介^[89,11]

Tab.2 Overview of major applications and characteristics of Al-Li alloys in aerospace field^[89,11]

阶段	牌号	主要应用	主要特点
第一代	2020	RA-5C 飞机垂直尾翼水平安定面	1.断裂韧度低;2.缺口敏感性高;3.加工生产困难;4.结构损伤容限;5.易产生疲劳裂纹。
	BAД23	未能在航空航天器材上正式使用	
第二代	1420	米格-29 型机身、油箱	1.各向异性严重;2.塑韧性水平低;3.热暴露后会严重损失韧性;4.大部分不可焊;5.强度较低;6.低腐蚀抗力;7.易产生加工缺陷。
	1421	ЯК-36、军舰	
	1423	米格-27	
	1441	Be-103 型水陆飞机机身蒙皮	
	2090	1.三角翼运载火箭,2.C17 运输机襟翼蒙皮,垂直尾翼,3.波音 747 前起落架支柱牵引。	
	8090	1.EHI0I 直升飞机机身框架、蒙皮;2.“大力神”运载火箭;3.F15 战斗机翼蒙皮;4.EAP 飞机机腹和襟副翼;5.幻影式战机身结构,桁条。	
	1430	TU-204 客机椭圆形截面机身	
	1450	AH-70 运输机机身	
第三代	1460	“能源号”运载火箭贮箱	1.密度小、模量高;2.良好的强韧性配比;3.耐损伤性能优良;4.各向异性好,可焊性好;5.热稳定性好;6.耐腐蚀;7.加工成型性好。
	1424	替代 2024、Д16 做蒙皮	
	1464	做框、梁、燃气储箱	
	1469		
	2199	A380-F 机身蒙皮	
	8091	远程导弹弹头壳体	
	8093	远程导弹弹头壳体	
	2065	机翼纵梁、空客 A380 地板横梁和座椅导轨	
	2099	A380 机身、地板横梁,机翼纵梁	
	2196	A380 飞机地板横梁,座椅导轨	
	2198	1.A350 客机蒙皮;2.猎鹰 9 号运载火箭燃料贮箱;3.C919 客机机身蒙皮。	
	2099	机身结构和下翼弦 C919 长桁	
	2195	“奋进号”航天飞机外贮箱	
	2050	A350XWB 机翼肋板和纵梁	
	Al-Li-S4	C919 客机机身蒙皮	
	2097	F16 战机后机身隔框、中机身大梁	
第四代	2197	1.F16 战斗机机身舱壁甲板;2.F22 战机后隔框。	1.高强韧性,耐损伤;2.加工性能好。
	2297	F16 战斗机	
	X2A66	飞机整体壁板结构	
	2055	取代了 2024-T3 和 7075-T6 用于机身、上下翼结构	
	2098	机身/压力舱蒙皮	
	2060	机身蒙皮	

国内对 Al-Li 合金的探索开始于 20 世纪 60 年代。在 Al-Li 合金研发初期,我国主要以仿制为主。以美国所研制的 2020Al-Li 合金为蓝本,最终成功研发出 S141Al-Li 合金。但由于早期制造工艺、设备等因素,该合金未能得到生产与应用。从“七五”到“十三五”期

间,国内对 Al-Li 合金的研究取得了显著合理,成功开发了 5A90、2A97 以及 X2A66 等一系列拥有自主知识产权的 Al-Li 合金,并且得到了实际应用(见表 3)。

C919 是我国自主研制的大型喷气式干线客机,C919 飞机的机身蒙皮、长桁、地板梁、座椅滑轨等部件

表 3 我国自主研制 Al-Li 合金性能及应用^[4,12-13]

Tab.3 Properties and applications of self-developed aluminium-lithium alloy^[4,12-13]

合金	性能特点	应用
5A90	低密度、中等强度、较好的耐蚀性和焊接性	制备长征 2 号火箭舱体和导弹壳体
2A97	较好的强韧性配比、优良的加工性能和焊接性	飞机后机架
X2A66	塑性好、强度高、良好的加工性能	制造整机壁板结构

均使用了 Al-Li 合金,其机体结构质量占比达到 7.4%,综合减重 7%,最终可使飞机铝合金部件的质量减轻 14%~30%,每架飞机每年飞行成本下降 2.2% 以上,轻量化成效显著^[14]。因此,高性能的 Al-Li 合金的开发得到国家重视。

2 Al-Li 合金的制备技术

由于 Li 具有活泼的化学性质,容易与水蒸气、氧气以及氮气等发生化学反应,产生杂质、气孔等缺陷。此外,在缺乏气体保护的熔铸环境下,Al-Li 合金铸锭中 H 的含量是传统铝合金的 50 倍^[15]。如果 Al-Li 合金铸锭中的 H 含量过高,熔体中会产生脆性的 LiH 和 Li₃AlH₆,其会对 Al-Li 合金的强韧性产生极为不利的影响^[16]。因此必须采取措施以避免此类杂质的生成。经过多年的实践,现有的制备 Al-Li 合金铸锭的方法主要有快速凝固技术和铸锭冶金技术。



图 1 粉末冶金制备 Al-Li 合金流程图^[4]

Fig.1 Flow chart of preparation of Al-Li alloys by powder metallurgy^[4]

喷射成形法是一种新的金属成型工艺。该方法和粉末冶金法一样,具备快速凝固特性,冷却速度较高,能够形成细小、均匀的微观结构,有效抑制成分偏析,提升材料性能^[19]。同时,喷射成形具有铸锭冶金法一步成形的优点,简化了生产流程,提高了生产效率。喷射成形技术为 Al-Li 合金的制备开辟了新途径。PU Q Q 等^[20]通过对比研究了喷射成形和传统铸造制备 2195Al-Li 合金的微观结构和力学性能的差异。两种方法制备 Al-Li 合金结晶过程见图 2。结果表明,传统铸造合金呈现明显的树枝晶结构(见图 2a),而喷射成形合金由细等轴晶粒组成(见图 2b)。传统铸造合金的

2.1 Al-Li 合金的快速凝固制备技术

Al-Li 合金的快速凝固制备技术主要包括粉末冶金技术(PM)和喷射成形技术(SF)两种。其中粉末冶金制备 Al-Li 合金是以 Al-Li 合金粉末为原材料,经过成型烧结得到最终制品,工艺流程图见图 1。经烧结得到的 Al-Li 合金后续通常采用热挤压或热等静压的方法成形。随后,为进一步提高 Al-Li 合金的性能还要经过固溶处理和时效处理。研究表明,采用粉末冶金技术制备的 2195Al-Li 合金具有等轴晶粒,平均晶粒尺寸约为 55 μm。该合金经过 370 ℃热挤压、520 ℃×2 h 的固溶处理及 170 ℃×24 h 的时效处理后,合金的抗拉强度从 153 MPa 增加到 662 MPa,屈服强度从 121 MPa 增加到 617 MPa,伸长率从 2.7% 提高到 6.6%^[17]。LÜ P H 等^[18]采用真空熔炼-气体雾化法制备 2195Al-Li 合金,研究了该合金经热挤压和热等静压(HIP)以及随后的固溶处理和时效处理(T6、T8)后合金的组织 and 力学性能的变化。结果表明,经过热等静压(HIP)处理后,合金呈现细晶,平均晶粒尺寸约为 2.89 μm,无明显缺陷,但存在 Mg 偏析。热挤压后,合金元素分布均匀,晶粒细化。热等静压后合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 223 MPa、217 MPa 和 12.2%,经过 T8 处理后,合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 600 MPa、576 MPa 和 9.0%。

晶界处存在连续的二次相(Al-Cu-Mg、Al-Cu 和 Al-Cu-Fe 相),而喷射成形合金的晶界处为半连续/不连续的二次相(Al-Cu 和 Al-Cu-Fe 相)。均匀化处理后,传统铸造合金的粗大低熔点二次相几乎完全溶解,而喷射成形合金的二次相几乎完全消失。喷射成形合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 223 MPa、141 MPa 和 3.7%,显著高于铸造合金的 165 MPa、112 MPa 和 2.4%。因为喷射成形制备 Al-Li 合金会出现一些气孔(见图 2b),对合金的力学性能不利,需要对采用热加工工艺(如挤压、轧制或热等静压等)进行处理^[21-22]。

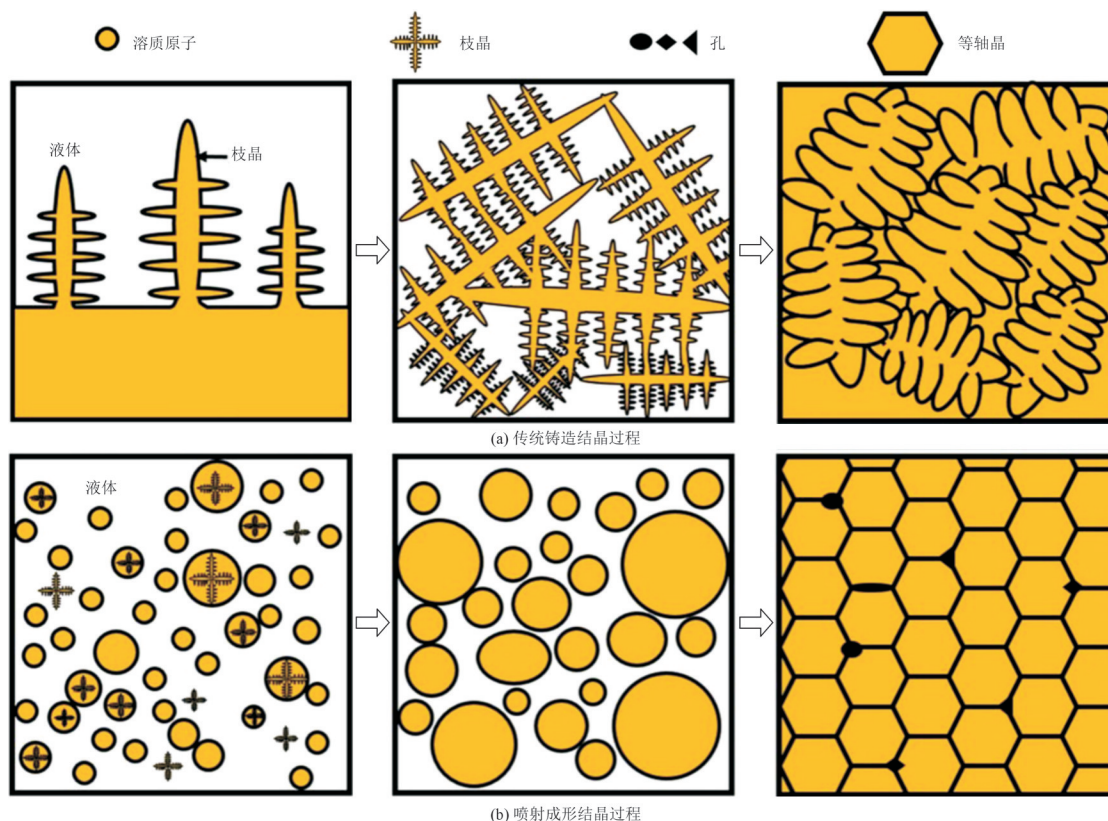

 图 2 不同成形方式 Al-Li 合金结晶过程示意图^[20]

 Fig.2 Schematic diagram of Al-Li alloy crystallization by different forming methods^[20]

2.2 Al-Li 合金的熔炼铸造

铸锭冶金技术工艺简单,可实现大规模生产。为防止熔融状态下的合金与普通的坩埚材料发生反应生成污染合金的杂质,通常采用石墨坩埚进行熔炼^[23]。为防止 Li 烧损及熔融金属液吸氢,Al-Li 合金的熔炼保护工艺主要有真空熔炼、惰性气体保护及熔剂保护等方法。

真空熔炼可有效防止 Li 的燃烧和损失,避免合金内部出现气孔、杂质等缺陷,从而获得纯净的熔体。XIN M L 等^[24]研究了不同工艺参数的真空离心铸造对 2060Al-Li 合金微观组织和力学性能的影响。结果表明,随着浇注温度的降低和转速的增加,晶粒尺寸逐渐减小,等轴晶比例增加。在浇注温度为 680 °C、转速为 900 r/min 时,该合金的晶粒尺寸最小(约为 64 μm)。T8 状态下,该合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 541 MPa、517 MPa 和 6.1%。

采用重力铸造制备 Al-Li 合金铸锭时则需要采用惰性气体或熔剂进行保护,其中,熔剂保护操作简便,应用更为广泛。熔剂类型不同,其对 Li 元素烧损的影响亦不同。图 3 为常用的熔剂对 Li 烧损的影响^[25]。可以看出,随着保温时间延长,Li 的烧损量均增加,但熔剂为 30% 的 LiCl+70% 的 KCl 时总烧损量最小。荣

冕^[26]以 Al-2Li-2Cu-0.2Zr 铸造 Al-Li 合金为对象,系统研究了不同保护性气氛对该合金熔炼质量的影响。结果表明,C₂Cl₆和氩气旋转喷吹的双级复合精炼能使铸造合金中的平均夹杂物体积分数从未精炼的 1.836% 降至 0.125% 以下;合金密度从未精炼的 2.46 g/cm³ 提升至 2.59 g/cm³;Li 的烧损率从未精炼的 23.7% 降至 14.4%;铸造合金的平均流动长度从 800 mm 增加到 1 240 mm;双级复合精炼后进行 T4 处理,合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 293 MPa、142 MPa 和 18.1%,显著高于未精炼的 179 MPa、113 MPa 和 3.9%。

低频电磁铸造(LFEC)是 CUI J Z 等^[27]在电磁半连

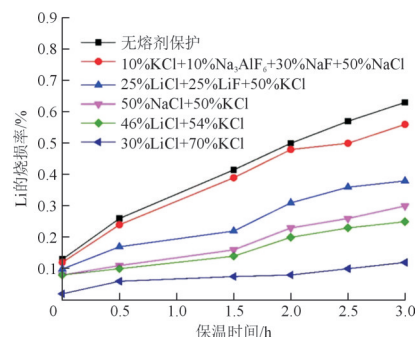

 图 3 Al-Li 合金常用保护剂及使用效果^[25]

 Fig.3 Common protective agents and usage effects for Al-Li alloy^[25]

续铸造(CREM)工艺的基础上开发的一种新型环保的铸造工艺^[28]。王复越^[29]研究了低频电磁铸造对 2195Al-Li 合金铸锭微观组织及力学性能的影响。结果表明,低频电磁铸造可以显著降低铸锭内部的气孔、氧化物夹杂等缺陷,获得洁净度较高的铸锭。低频电磁铸造制备的 2195Al-Li 合金经过 T6 处理后,析出的强化相 T_1 相和 θ' 相尺寸比直接连铸(DC)制备的小很多。在 10 Hz/150 A 的磁场条件下,合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 607.9 MPa、521.0 MPa 和 10.6%,分别较 DC 制备的合金高 13.1%、12.1% 和 1.9%。

超声波振动在铝合金铸造工艺中已得到广泛的应用^[30-32]。LI J Y 等^[33]研究了超声处理和 Li 含量对挤压铸造 Al-5Cu- x Li 合金微观组织和力学性能的影响。结果表明,超声辅助熔炼后进行挤压铸造可以有效消除 Al-5Cu-0.6Li 合金中的孔洞和成分偏析,细化晶粒,其晶粒尺寸比重力铸造(GC)合金细化了 52.5%,同时具有显著除氢效果。当 Li 含量为 0.6% 时,合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 300 MPa、190 MPa 和 16.5%。

电磁模拟微重力冶金法是一种借助电磁模拟设备,模拟微重力环境来熔炼合金的方法。耿桂宏等^[34]研究了利用电磁模拟微重力技术制备高 Li 含量(5%~10%)的 Al-Li 合金的方法及其效果。结果表明,该方法制备的锂质量分数为 5%~10% 的二元 Al-Li 合金无偏析现象,晶粒组织致密。

熔盐电解法是通过电解熔融盐制备金属的方法,其在制备活泼金属(如 Al、Mg、Li 等)方面具有显著优势。刘智伟^[35]采用熔盐电解法制备了 Al-Li 合金。结果表明,在 Urea-LiCl 体系中,随着电解温度升高,合金中 Li 含量增加。在 373 K 温度下, Li 含量可达到 6.87%,还原产物为 AlLi 相。

2.3 激光选区熔化(SLM)制备 Al-Li 合金

激光选区熔化(SLM)具备实现材料、结构与性能一体化制造的潜力^[36]。SLM 技术可以制备结构复杂零件,该技术还具备较高的尺寸精度和优异的性能^[37]。但激光选区熔化制备 Al-Li 合金过程中容易出现裂纹、孔隙缺陷,而 Li 的加入最终会增大合金的热膨胀系数^[38-39]。通过合金化方法可以使合金晶粒向等轴晶转变及细化晶粒尺寸,减小合金凝固时的温度区间^[40]。LI L 等^[41]研究了扫描速度对激光选区熔化制备的 Al-Li 合金组织的影响。发现 SLM 成形 Al-Li 合金过程中不可避免出现微孔、微裂纹等缺陷,导致相对密度不超过 95%。随着扫描速度增加,熔池边界先出现柱状枝晶后转变为等轴晶且可以细化晶粒。

综上所述,Al-Li 合金熔炼工艺具有诸多显著特点:优质的原材料是获得高性能 Al-Li 合金的基础;严格的气体保护才能确保 Li 的有效含量和合金成分的准确性;精确控制熔炼温度、时间以及搅拌强度等参数十分关键,其直接影响着元素在合金中的均匀分布情况和合金的最终性能。此外,高效的除气除杂环节也不可或缺,这有助于提升合金的纯度,增强其质量。未来借助先进的模拟技术,如计算机模拟和数值分析,深入研究熔炼过程中温度场、流场以及元素扩散等情况,从而实现对工艺参数的精准调控,可最大程度提高合金性能的稳定性和一致性;研发新型熔炼设备与工艺也是热点研究内容之一。此外,绿色环保也是未来 Al-Li 合金熔炼工艺发展不可忽视的方向,继续优化增材制造工艺参数,降低熔炼过程中的能源消耗,减少污染物排放,从而实现可持续发展。

3 Al-Li 合金强韧化途径与相关机制

3.1 微合金化对 Al-Li 合金性能的影响及机制

随着科技的不断发展,航空航天领域对构件的需求不再局限于减重,还对构件的综合性能或某些特殊场合的使用性能提出了更高的要求。为此,研究者通过添加少量的 Mg、Mn、Zr、Sc、Zn、Ag、Ni, 以及 Be、La、Y 等微合金化元素改变 Al-Li 合金的析出相类型、形貌和分布,进而改变 Al-Li 合金的性能。Al-Li 合金的主要析出相包含 T_1 -Al₂CuLi、 θ' -Al₂Cu、 δ' -Al₃Li、 β' -Al₃Zr、 S' -Al₂CuMg、 T_1 -Al₆CuLi₃ 和 Al₃(Sc、Zr) 复合粒子等。其对 Al-Li 合金的组织 and 性能的影响总结见表 4。

表 4 Al-Li 合金中的微合金元素对应的析出相及其对 Al-Li 合金组织和性能的影响^[4,42-52]

Tab.4 Precipitates corresponding to microalloying elements and their effects on microstructure and properties of Al-Li alloy^[4,42-52]

合金元素	析出相	影响
Mg	S' -Al ₂ CuMg	促进 T_1 -Al ₂ CuLi 相析出
Mn	Al ₆ Mn、Al ₂₀ Cu ₂ Mn ₃	抑制再结晶、提高合金塑性、降低各向异性
Zr	β' -Al ₃ Zr	抑制再结晶、促使 Al ₃ Li 均匀分布
	Al ₃ (Sc、Zr)	弥散强化、细化晶粒
Sc	Al ₃ Sc	加速合金时效过程、减少各向异性
Zn	—	提高合金强度、促进 δ' -Al ₃ Li 析出
Ag	—	固溶强化、改变时效析出顺序
Ni	Al ₃ CuNi	减少固溶体 Cu 原子数量、抑制 δ' -PFZ 的形成和生长
Ce	Al ₈ Cu ₄ Ce、AlCuCe 等	细化铸态组织晶粒、提高合金塑性
La、Y	—	改善合金强韧性和晶粒尺寸、减轻杂质元素的危害
Mg+Ag	Ag-Mg 团簇	促进 T_1 相析出、提高合金时效硬化能力

Al-Li 合金中各析出相的形貌及分布示意图见图 4^[53]。可以看出, Al-Li 合金中 T_1 相主要为针状, 与铝基体取向关系为: $(0001)_{T_1} // (111)_{Al}$, $(1011)_{T_1} // (111)_{Al}$, $(1120)_{T_1} // (211)_{Al}$; θ' 相为圆盘状, 沿着 $\{001\}_{Al}$ 面生长; δ' 相则为球状, 沿铝基体 $\{100\}$ 面析出; S' 相为板条状, 在 $\{012\}_{Al}$ 面上沿着 $\langle 100 \rangle_{Al}$ 方向生长, 取向关系为 $[101]_{S'} // \langle 100 \rangle_{Al}$; $[101]_{S'} // \langle 012 \rangle_{Al}$; β' 相也是球状, 其与基体完全共格^[54]。CHUNG T 等^[55]指出沿着 $\langle 100 \rangle_{Al}$ 方向, 可以观察到针状 T_1 相, 沿着 $\langle 001 \rangle_{Al}$ 方向, 可以观察到盘状 θ' 相。

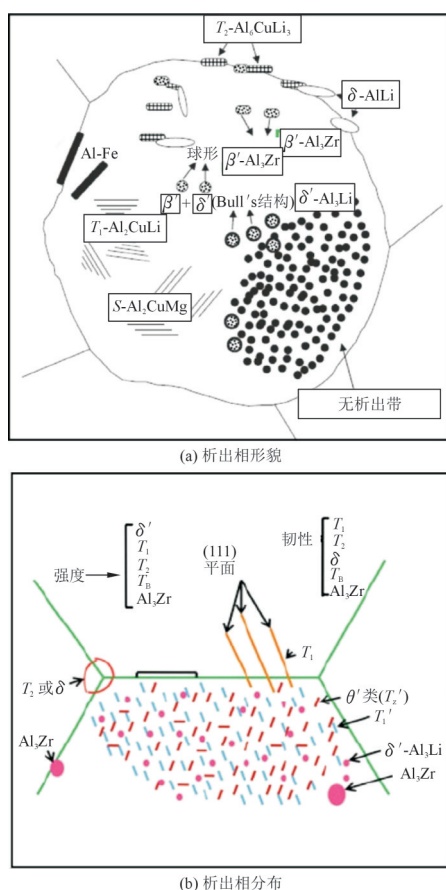


图 4 Al-Cu-Li 合金主要析出相形貌及分布示意图^[53]

Fig.4 Schematic diagram of morphology and distribution of main precipitated phases in Al-Cu-Li alloys^[53]

Al-Li 合金最终的强化效果主要由析出相的种类、尺寸大小、数量密度及其分布状态共同决定的。总体而言, 析出相的尺寸越小、含量越高、分布越均匀, 其强化效果越好^[56-57]。析出相对 Al-Li 合金的强化作用主要表现在其对位错的阻碍作用, 位错和纳米析出相之间的相互作用方式主要为切过机制和 Orowan 绕过机制。BLANKENSHIP JR C P 等^[58]提出了这两种强化机制之间转变的临界厚度 d_c 为:

$$d_c = 4\pi G_m b / G_p \quad (1)$$

式中, b 为伯格常数 (铝合金中 $b = 0.286 \text{ nm}$); G_m 和

G_p 分别为基体和析出相的剪切模量 (2195Al-Li 合金剪切模量为 27.8 GPa ^[59], T_1 相的剪切模量为 131 GPa ^[60])。当析出相的实际厚度大于临界厚度时, 位错与析出相之间的相互作用以绕过机制为主, 否则以剪切机制为主。 T_1 相与基体之间呈现出半共格的关系, 当处于欠时效状态时, 位错切过 T_1 相, 但在峰值时效以及过时效状态下, 位错绕过 T_1 相形成位错环^[61]。

T_1 相强化贡献关系为:

$$\tau_A = \frac{1.211 D \gamma_{\text{eff}}^{3/2}}{w^2} \sqrt{\frac{b f_v}{\Gamma}} \quad (2)$$

式中, D 为 T_1 相的平均直径; w 为 T_1 相的厚度; γ_{eff} 为有效界面能; b 为伯氏矢量; Γ 为位错线密度; f_v 为析出相体积分数。

可见 T_1 相的强化效果与体积分数呈正相关关系, 即随着其体积分数的增加, 强化效果也相应增强^[62]。研究表明, Al-Li 合金析出相之间的强化效果一般为: $T_1 \text{ 相} > \theta' \text{ 相} > \delta' \text{ 相}$ ^[63]。所以 T_1 相的尺寸以及体积分数调控至关重要, 将直接影响到 Al-Li 合金的性能。

3.1.1 Mg、Ag、Zn 微合金化

Mg 是 Al-Cu-Li 系最主要的微合金元素。Mg 的加入不仅具有固溶强化的作用, 还可以促进 S' - Al_2CuMg 的析出。此外, Mg 与淬火产生的过饱和空位结合能大于 Ag 和 Cu, 所以大量的“Mg-空位”会在位错形成^[64]。由于 Mg 和 Cu 之间存在较大的相互作用, “Mg-空位”会吸附 Cu 形成“Mg-Cu”原子簇^[65]。“Mg-Cu”原子簇会促进 T_1 相在位错的形核^[66]。QI F Z 等^[67]研究了微量 Mg 添加对铸造 Al-Li-Cu-Zr 合金微观结构的影响。发现 Mg 的添加导致低熔点的 S' - Al_2CuMg 共晶相形成, 并促进晶粒细化, 当 Mg 含量为 0.2% 时, 合金的平均晶粒尺寸从无 Mg 合金的 $107.6 \mu\text{m}$ 降至 $98.1 \mu\text{m}$ 。T6 处理条件下, Mg 的添加会促进 G.P. 区的生成, 抑制 θ' 相析出并促进 T_1 相析出。WANG X M 等^[68]研究了高镁含量对 Al-Cu-Li 合金时效析出行为的影响。结果表明, 合金中的 Mg 含量过高, 会促进 S' - Al_2CuMg 相的析出, 抑制 T_1 相和 θ' 的析出, 主要原因是 S' 相的析出消耗了 Cu 原子。

Ag 的加入也会产生固溶强化效果^[2]。Ag 和 Mg 原子会形成 Mg-Ag 团簇, 位错处 Mg 和 Ag 原子的富集会降低 T_1 相的形核能垒^[65,69-70]。LIU D Y 等^[71]研究了 Ag 对 Al-Cu-Li-Mg 合金微观组织的影响。发现 Ag 的加入会促进 T_1 相的析出, 晶界处会形成含 Ag 和 Mg 的粗大富 Cu 相。这些粗大相会在过时效阶段加快硬度的下降。XU X X 等^[72]研究了通过优化 Ag、Mg 质量比来调节 Al-Cu-Li-(Mg-Ag) 合金中相的析出行为, 并探讨

其对合金力学性能的影响。发现在时效温度为 150 °C 下, Ag、Mg 质量比低于 0.95 的合金析出序列为 S.S.S.→G.P. 区+ $\delta'/\beta'\rightarrow S'+T_1$, 而 Ag、Mg 质量比高于 1.87 的合金析出序列为 S.S.S→G.P. 区+ $\delta'/\beta'\rightarrow \theta'+T_1$ 。Ag、Mg 质量比为 1.87 时, 合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率达到最高, 分别为 717 MPa、705 MPa 和 5.5%。

Zn 的加入具有固溶强化以及时效强化的作用^[47]。Zn 可以促进 δ' 相析出, 以及 S' 和 T_1 相形核^[73]。Zn 和 Ag 有着共同的效果, 改善合金的腐蚀性能。这是因为晶界析出相中含 Zn 的粗大 T_1 相比比例增加, 进而改善合金的耐腐蚀性^[74]。

研究表明, Mg、Ag、Zn 微合金元素同时添加对 T_1 相的促进作用更佳, 所以研究三者添加比例成为超高强 Al-Li 合金微合金化设计的主要方向^[75]。GUMBANN E 等^[76] 研究了 Mg、Ag、Zn 微合金的添加对 Al-Cu-Li 合金析出动力和强化的影响。发现含 Mg 的基础上添加 Ag 和 Zn, 能够增强析出动力, 提高析出相的体积分数, 从而增强了合金的强度。微合金元素对 T_1 相析出的促进作用, 从高到低为: Mg+Ag+Zn>Mg+Ag>Mg+Zn>Mg。

3.1.2 Zr、Mn 微合金化

Zr 作为良好的变质剂, 其在铝合金中含量一般为 0.05%~0.16% (质量分数), Zr 加入到 Al-Li 合金中可以形成 β' -Al₃Zr 弥散相^[77]。 β' 相与基体共格, 可以阻碍晶界的移动, 抑制再结晶行为^[44]。DENG S X 等^[78] 研究了 Zr 添加量对挤压 Al-Cu-Li-Mn 合金微观组织和力学性能的影响。结果表明, 含有 Zr 的 Al-Li 合金晶粒尺寸为 325 μm , 较无 Zr 的降低 6.9%。T6 处理后, 添加 Zr

的 Al-Li 合金抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 621 MPa、599 MPa 和 6%, 分别较无 Zr 合金提高 12.7%、13.9% 和 20.0%。

Mn 加入到 Al-Li 合金中会生成 Al₆Mn 或棒状 Al₂₀Cu₂Mn₃ 的弥散相, 这些析出相可以抑制再结晶、提高合金塑性、降低各向异性等^[4]。由于制备 Al-Li 合金的原材料中的杂质、工具等磨损, 不可避免地会引入杂质元素 Fe, Fe 在 Al-Li 合金中形成的富 Fe 相会降低合金的塑性和韧性。Mn 的加入可以改变晶界富 Fe 相形态, 从而减轻其对合金力学性能的不利影响^[79]。但 Mn 的含量超过 0.8% 时, 会导致时效过程中 T_1 相的数量密度减少, 这是因为 Al₂₀Cu₂Mn₃ 弥散相消耗了 T_1 相所需的 Cu 原子^[80]。

3.1.3 Sc、Ce 等稀土元素微合金化

在铝合金中添加微量的稀土元素, 可对合金的显微组织产生影响, 增强塑性、腐蚀抗力和焊接性能, 同时对合金起到净化效果, 并减轻杂质元素所带来的危害^[81]。Sc 是 Al-Li 合金中的变质剂, 同时也是微合金化最为有效的元素之一^[82]。Sc 加入到 Al-Li 合金中, 有细化晶粒、提高热稳定性、抑制再结晶以及促进强化相析出, 从而提高合金的塑性、强度等作用。少量 Sc 元素的添加还能够形成 L12 型共格的 Al₃Sc 粒子^[83], 同时加入 Zr 和 Sc 则能够形成 Al₃(Sc, Zr) 弥散相, 从而起到弥散强化和细晶强化的作用^[44]。LI C L 等^[84] 研究了 Sc 含量对 Al-Cu-Li 合金在铸态及均匀化条件下微观组织和 W 相演化的影响。发现 Sc 的加入可以显著细化晶粒尺寸 (见图 5)。当 Sc 含量为 0.16% 时, 晶粒尺寸从不含 Sc 合金的 216 μm 降至 42.7 μm 。在均匀化处理之后, 铸态合金中的 Al₂Cu 及含 Ag 的 Al₂CuMg 完全溶解, 仅保留少量球状残余 W-Al_{8-x}Cu_{4+x}Sc 相。

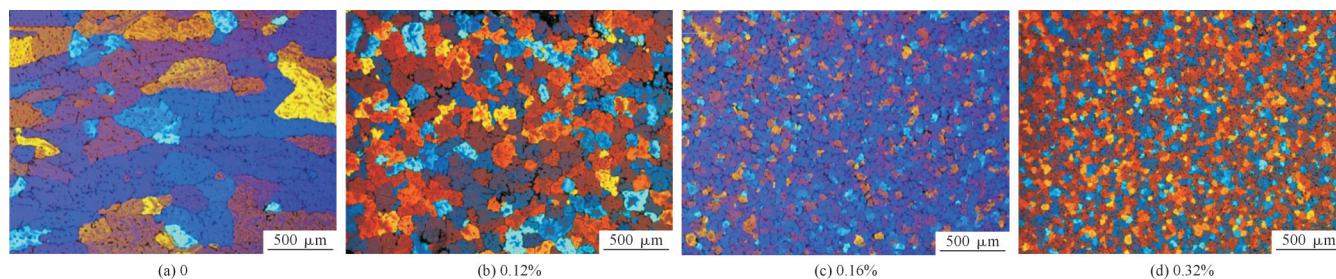


图 5 不同 Sc 添加量的铸态合金光学显微组织^[84]

Fig.5 OM images of as-cast alloys with different Sc additions^[84]

Ce 加入到 Al-Li 合金中可以细化晶粒, 但过多的 Ce 则会导致晶粒粗化, 同时还有净化效果以及提升塑性的作用, 并且还会促进 Al₈Cu₄Ce 粒子析出^[50]。DING X X 等^[85] 研究了 Ce 含量对 Al-Cu-Li 合金微观组织和力学性能的影响。结果表明, 随着 Ce 的加入, 铸态

合金的晶粒得到细化, 同时 Al₈Cu₄Ce 可以抑制再结晶。T6 处理后, 合金的强度先增加后降低, 当 Ce 含量为 0.1% 时, 合金的抗拉强度最高, 为 514 MPa。

Be、La、Y 等稀土元素加入到 Al-Li 合金中可以改善合金强韧性和晶粒尺寸、减轻杂质元素的危害, 进而

可以提高合金的强韧性^[51]。

上述合金元素协同作用,可全方位提升Al-Li合金的综合性能,使其在航空航天等领域发挥重要作用。

3.2 热处理对Al-Li合金性能的影响及机制

Al-Li合金属于析出强化型铝合金,固溶处理是Al-Li合金一种有效的强化方式,其强化效果取决于淬火介质、淬火方式、固溶温度和时间等。朱庆丰等^[86]研究了2050Al-Li合金在不同固溶温度下组织和性能的变化。发现固溶处理可以使合金中的相得到回溶,固溶温度达到525℃时,此时残余相主要为含Fe的难溶相,但固溶温度进一步增加,则会造成过烧现象。当固溶工艺为550℃×2h时以及经过170℃×40h人工时效后,2050合金的抗拉强度和屈服强度分别达到567MPa和505MPa,伸长率则是随着固溶温度升高,先降低后趋于稳定。马子博等^[87]研究了2A97Al-Li合金在不同的固溶温度以及时间下的组织和性能变化。结果表明,固溶处理工艺为510℃×90min时,合金具有最佳的强度与硬度配合。这主要归因于细晶强化以及位错强化。ZHOU J等^[88]研究了固溶处理和时效对2060Al-Li合金力学性能的影响。结果表明,固溶处理可以使合金中富Cu的第二相回溶到铝基体中,从而获得过饱和固溶体。随着固溶程度提高,合金的强度和硬度提高,但塑性变差。在466℃×60min固溶处理和185℃×13h时效处理下,2060Al-Li合金的抗拉强度和伸长率分别达到500MPa和12%,实现强度和韧性的最佳结合。

在固溶处理后通常都要对Al-Li合金进行时效处理,以改善材料的综合力学性能。Al-Li合金的时效处理工艺分为单级时效和多级时效。研究发现,当合金在190℃左右进行单级时效处理时,随着时间的推移,沉淀相逐渐长大,在适当的时效时间(如8~12h)内,可以使合金的屈服强度和抗拉强度显著提高。ZHANG S等^[89]研究了时效处理对铸造Al-Li合金高温力学性能的影响。发现在室温环境下,合金的强度会随时效时间的增加而提高;当时效64h时,合金在225℃下表现出优异的高温性能,屈服强度达到302MPa,抗拉强度达到312MPa,伸长率为4.4%。DUAN S W等^[90]研究了时效析出行为对铸态Al-Li合金力学性能的影响。在175℃时效温度下,自然时效析出相会快速溶解,立方相、 T_1 相、 θ' 相、S相和 Ω 相会析出;经过30h的时效处理后,Al-Li合金的抗拉强度和伸长率分别达到423MPa和7.2%。

对强度和硬度要求适中的零部件采用单级时效即可满足相应使用要求。但是由于单级时效是在单一温度下进行时效,沉淀相的生长可能会比较快,导致沉淀

相尺寸较大,而且分布不够均匀。这会影响合金的综合性能,特别是韧性和抗疲劳性能可能会降低。因而无法满足更高使用性能要求的航空航天零部件的需求,由此多级时效应运而生。对于航空发动机叶片等对材料性能要求极高的Al-Li合金零部件,多级时效可以使合金在强度、韧性、抗疲劳性和抗腐蚀性等方面达到很好的平衡。

多级时效是指将Al-Li合金在两个或多个不同的温度下依次进行时效处理的工艺。目前大多数相关研究在工艺上选择倾向于双级时效。研究发现,第一级时效温度在100~150℃,这个温度相对较低,有利于形成大量细小的晶核。第二级时效在150~200℃进行,此时,之前形成的晶核会在这个较高温度下缓慢生长。这种先形成大量细小晶核,再让晶核生长的方式,可以使沉淀相的尺寸和分布更加合理。如在第一级时效中形成的 δ' -Al₃Li晶核,在第二级时效时,晶核会在合适的温度和时间控制下,逐渐长大成为更加稳定的强化相,有效提高合金的强度和韧性。可见,多级时效工艺可以更精细地控制合金中沉淀相的形成和生长过程。

时效性能主要受到时效温度以及时效时间两个因素影响。倘若时效温度偏低,强化相就难以获得充足的动力析出;温度过高,强化相变得粗大,影响强化效果。王志文等^[91]研究了时效对挤压态2195Al-Li合金组织和性能的影响。结果表明,欠时效时,合金中析出相主要为球形 δ'/β' 复合相,并伴有G.P.区形成。在峰时效时,合金析出相主要是 T_1 相和 θ' 强化相。过时效过程中, T_1 相和 θ' 强化相开始粗化,析出强化效果减弱。XIE B X等^[92]研究了预变形以及单级和双级时效对2195Al-Li合金析出行为的影响。发现当预变形7%,120℃×4h+160℃×24h处理时,合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到606MPa、541MPa和11%。XU J U等^[93]研究了时效对Al-Cu-Li合金析出行为和力学性能的影响。结果表明,预变形5%,120℃×12h+155℃×12h处理时,合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到629MPa、609MPa和11.5%。但时效处理所需生产周期相对较长,会导致产品整体生产效率较低。这一问题可以通过适当的形变热处理加以解决。

常规的时效工艺都是在等温环境下进行的,在非等温环境下时效研究较少。研究表明,降温T8时效处理可以在不降低伸长率的同时提高Al-Li合金的强度^[94]。LI Y等^[95]研究了2050合金在非等温时效过程中微观组织和力学性能的变化。发现在非等温时效加热阶段,合金的强度随时效温度的升高而增加,但伸长

率下降;非等温时效降温阶段,合金的强度先降低后增加,当温度降至 150 ℃时,合金的抗拉强度、屈服强度达到最大值,分别为 568 MPa 和 544 MPa,伸长率达到最小值 9.8%。非等温时效处理后合金的主要强化机制为 Orowan 绕过机制。

3.3 形变热处理对 Al-Li 合金性能的影响

形变热处理(Thermomechanical treatment, TMT)是提升 Al-Li 合金强韧性最有效的工艺方式之一。在时效处理之前,对合金进行一定的预变形处理,不仅能够为析出相提供大量的形核位置,而且能够很大程度减少时效所需的时间。张义俊等^[96]研究了时效温度、时效时间和预变形量对 2195Al-Li 合金显微组织和力学性能的影响。结果表明,预变形处理的 T8 态(预变形量 5%+175 ℃×36 h)Al-Li 合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率较 T6 态(175 ℃×48 h)Al-Li 合金分别提高了 11.58%、22.97% 和 17.78%。魏辽等^[97]研究了 3% 的拉伸预变形对 Al-4.28Cu-1.33Li-0.40Mn-0.30Ag-0.14Zr 合金单级和双级时效组织和性能的影响。发现在峰值时效(190 ℃×7 h)基础上,第二级时效(100 ℃×24 h)可使得合金屈服强度提高 10 MPa;在双级时效(190 ℃×7 h+100 ℃×24 h)之前若增加 3% 的预变形,则可使得合金的抗拉强度和屈服强度分别达

到 748 MPa 和 730 MPa,屈服强度增加约 20%。此时,其伸长率仍能达到 4.17% 的水平。谢冰鑫等^[98]研究了 2195Al-Li 合金在不同形变热处理下的时效析出行为及其强化机理。结果表明,预变形可显著提高 T_1 相的形核率并加速其长大过程。位错在 T_1 相处多沿着垂直于直径的方向剪切,有效阻止了微观尺度上的塑性局部化。CHEN W B 等^[99]研究了冷轧预变形对 V-1469Al-Li 合金组织和性能的影响。发现当变形量为 10% 时,合金的抗拉强度和屈服强度分别达到 600 MPa 和 560 MPa,而且伸长率还能保持在 7% 以上。还分析了 V-1469Al-Li 合金在不同预变形量条件下,析出相的变化情况,见图 6。可以看出,随变形量的增加, θ' -Al₂Cu 相的析出受到抑制, T_1 相的析出越来越多。当变形量进一步增加到 10% 和 15% 时, T_1 相均匀弥散分布于晶粒中。

从图 6 还可以看出,通过预变形可以引入大量的位错从而提高 Al-Li 合金的强韧性。因此,预变形对铝锂合金的强化机制为位错强化。预变形引入位错后的位错强化效应可由下式计算^[100]:

$$\sigma_b = M \alpha b G \sqrt{\rho} \quad (3)$$

式中, M 为泰勒因子(变形铝合金 $M=3.1$); α 为无量纲常数; G 为剪切模量; ρ 为位错密度。

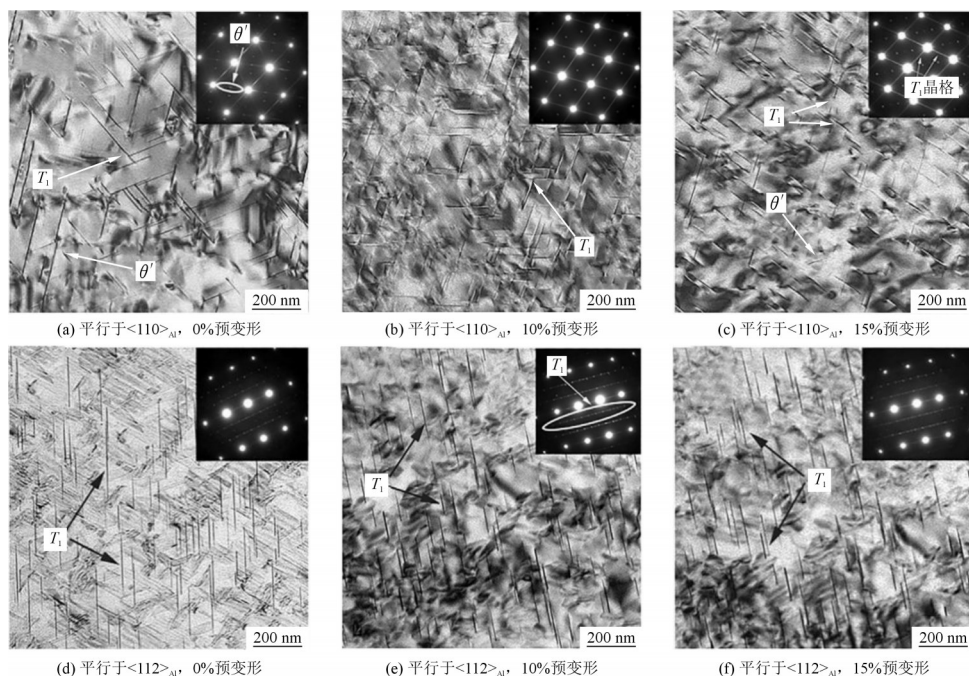


图 6 V-1469Al-Li 合金在不同预变形工艺下的 TEM 和 SAED 图^[99]

Fig.6 TEM and SAED images of V-1469 Al-Li alloy under different predeformation processes^[99]

3.4 其他热处理技术对 Al-Li 合金性能的影响

常规的形变热处理(TMT)可以引入位错,促进析出相的形核,进而提升合金的强韧性,其工艺路线为:

固溶淬火→预变形→人工时效^[101]。针对高性能 Al-Li 合金构件的成形难题,徐佳辉等^[102]提出了一种新的热处理工艺,即电磁形变热处理(ET),其工艺路线为:固溶淬火→电磁形变→人工时效。相较于传统的形变

热处理,电磁形变热处理将原来的准静态形变变为电磁形变。电磁形变优势主要有:成形极限高、贴膜性佳、表面质量高、合金的屈服比低以及加工硬化能力强。XIE B X等^[103]对比研究了传统准静态形变和电磁形变对2195Al-Li合金微观组织和力学性能的影响。结果表明,电磁形变处理的 T_1 相厚度为0.94 nm,而准静态形变处理的 T_1 厚度为1.92 nm。电磁形变的合金具有更高的位错密度,增加时效动力学,获得稳定性更好的 T_1 相,并抑制其粗化。电磁形变7%合金的力学性能达到最佳,抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为664 MPa、631 MPa和11%。

蠕变时效是利用蠕变进行变形和利用时效进行强化的一种适用于可热处理铝合金的成形性一体

化技术^[104]。张力文^[105]研究了Al-Li合金初始状态对蠕变时效行为的影响及机制。结果表明,重固溶态下Al-Li合金的蠕变时效的力学性能>峰时效态的>回归态的,其强化效果是强化相(T_1)在晶粒内部分布均匀和晶界较窄的无析出带(PFZ)联合作用的结果。

HAN J Q等^[106]研究了在应力时效处理过程中, T_1 相的析出行为及其对力学性能的影响。结果表明,应力时效促进 T_1 相的析出,抑制了 θ' 相,且应力时效试样的位错密度更高,见图7。应力时效提高了合金的强度,2%预变形+155℃×24 h,100 MPa应力下,合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为649 MPa、623 MPa和10.5%。

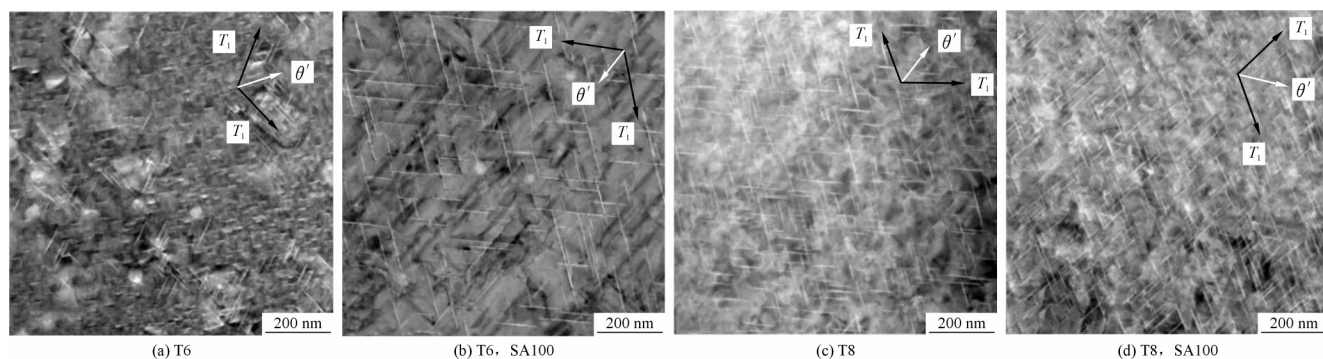


图7 2055Al-Li合金不同时效处理后 T_1 相HAADF-ATEM图^[106]

Fig.7 HAADF-ATEM images of T_1 phase in AA2055 Al-Li alloys after various aging process^[106]

3.5 表面改性技术对Al-Li合金性能的影响及机制

预变形处理工艺是对材料的整体进行相应的变形处理工艺,不适用于无法进行整体预变形处理的零件。表面改性技术可以针对表面或局部进行变形处理,操作上具有更大的灵活性。此外,通过表面改性处理,可以改善零件的表面完整性,使材料的疲劳强度、硬度、耐磨性及耐腐蚀等综合力学性能得到进一步提高^[107]。表面改性的方法包括超声喷丸(Ultrasonic shot peening process, USSP)、表面机械研磨处理(Surface mechanical grinding treatment, SMGT)、激光冲击强化(Laser shock peening, LSP)和超声表面滚压(Ultrasonic surface rolling process, USRP)等。其中,LSP具有:①高数值的冲击压力波;②可操作性强,应用范围广;③适用性好;④高能低耗等特点,在Al-Li合金的表面改性处理中应用较多^[108]。黄浩等^[109]研究了喷丸对2A97Al-Li合金表面完整性及耐蚀性的影响。结果表明,喷丸使合金表面发生了严重的塑性变形,粗糙度增加,喷丸试样具有更好的耐腐蚀性。李茂林等^[110]研究了机械研磨对1420Al-Li合金微观组织的影响。结果表明,机械研磨使合金表层发生了严重的塑性变形,从表层到基体依次是纳米层、

亚微米层、过渡层、基体组织。WANG J等^[111]研究了LSP对T6和T8态的2198Al-Li合金组织和性能的影响。结果表明,T8+LSP处理不仅能够提高合金的强度而且不会降低其塑性,合金的抗拉强度达到564.5 MPa,伸长率保持在13.4%以上,较T8态的2198Al-Li合金分别提高了6.8%和10.7%。LSP处理后的T8试样的硬度值(HV)提高了64.3,引入的残余压应力值约为一275 MPa。图8为2198Al-Li合金经过激光冲击处理后明场TEM图像,可以看出位错密度大幅提升,实现了位错强化。YANG Y等^[112]研究了LSP对2195Al-Li合金组织和性能的影响。结果表明,激光冲击能够明显细化合金表面组织至纳米级,随着激光冲击次数的增加,晶粒被不断细化,3次冲击后,晶粒尺寸细化至70 nm。胡维娜^[113]研究了LSP对2060Al-Li合金微观组织和性能影响。发现LSP处理后2060Al-Li合金不发生相变,合金硬度提升了21.5%,引入了280.6 MPa的残余压应力。

研究表明,通过表面改性技术可在材料的表层中形成细小的晶粒微观结构,而材料的心部保持原来的粗晶(CG)结构,从而使材料获得了梯度纳米结构^[114]。这种梯度纳米结构有助于材料性能的提升。鲁金忠

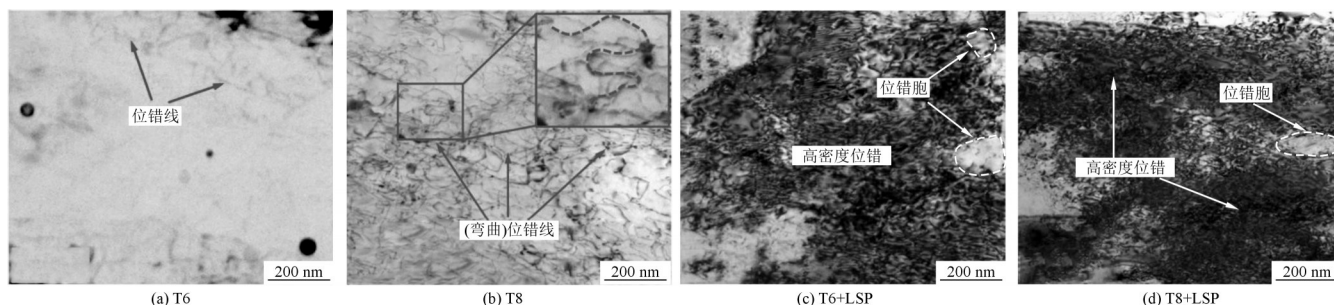


图8 Al-Cu-Li合金不同工艺明场 TEM 图像^[111]

Fig.8 Bright-field TEM images of Al-Cu-Li alloy with different processes^[111]

等^[115-116]在研究激光单次冲击对 LY2 铝合金微观强化层,并且细化合金晶粒,进而提高合金的屈服强度以及抗疲劳能力。其强化机制见图9和图10。

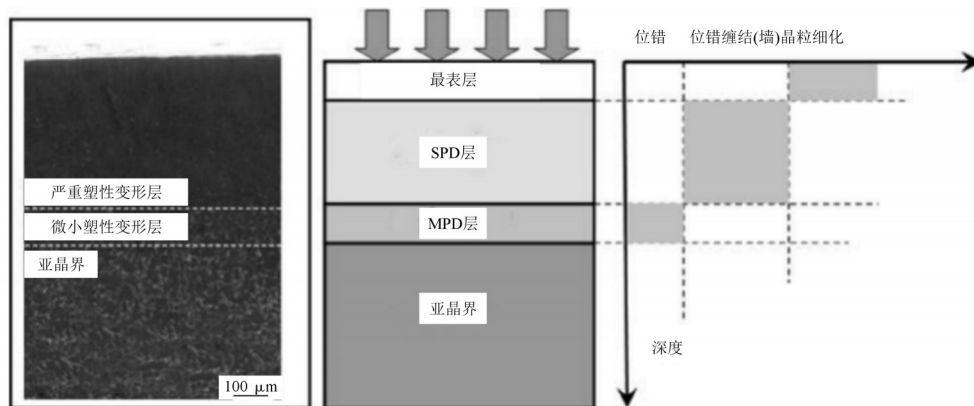
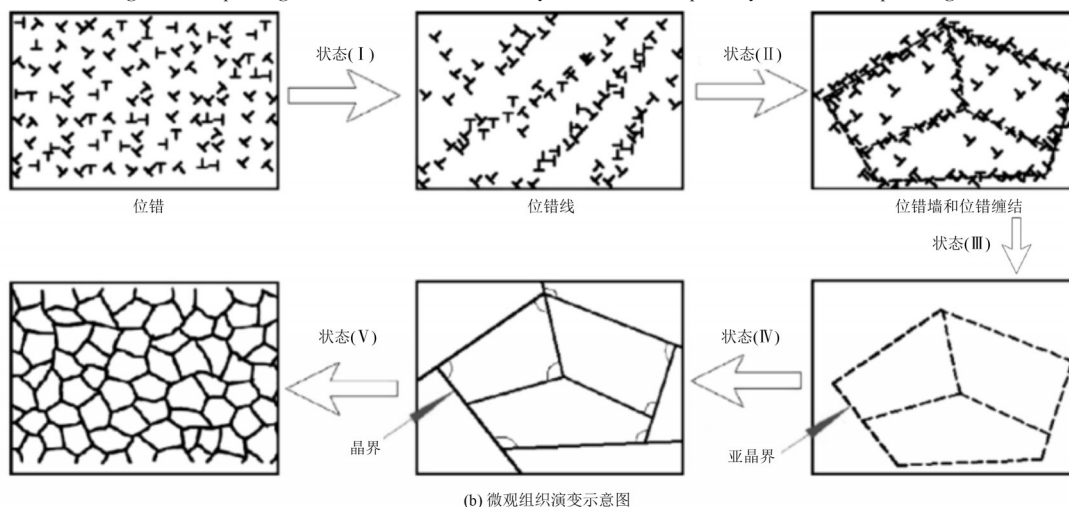


图9 激光冲击强化下 LY2 铝合金不同深度形貌^[116]

Fig.9 Morphologies of LY2 aluminum alloy in different depths by laser shock peening^[116]



(b) 微观组织演变示意图

图10 激光冲击强化 LY2 铝合金的位错细化机制^[116]

Fig.10 Dislocation refinement mechanism of LY2 aluminum alloy by laser shock peening^[116]

4 结 语

Al-Li 合金因其质量轻、强度高、综合性能好,在航天航空领域具有广泛的应用前景。经过一个世纪的发展,研究者针对 Al-Li 合金强韧性进行了大量的研究,并且取得了显著的进展。采用微合金化、形变热处理以及表面改性技术等处理方式可以提高和改善 Al-Li

合金的强韧性,其强化机制主要为析出强化、细晶强化和形变强化。但 Al-Li 合金强韧性研究仍面临诸多挑战,需要结合新的技术和方法进一步探索 Al-Li 合金的强韧化方法,深入研究其强韧化机理,为 Al-Li 合金的应用提供参考。具体可从以下几方面开展工作。

(1)作为航空航天领域重要的结构材料,Al-Li 合金的研究备受瞩目。目前,新型 Al-Li 合金仍旧主要依靠国外供应商,不仅成本高,而且得不到钣金、热处理

等相关关键技术的支持,因此独立开发和研制新型高强 Al-Li 合金是我国 Al-Li 合金未来发展的重要方向。此外,Al-Li 合金和复合材料是未来民用飞机的重要选择,如何提高其减重效益、强度和损伤容限是开发新型合金面临的重大挑战。

(2) Al-Li 合金的制备工艺对其强韧性有着决定性作用。现有 Al-Li 合金熔炼技术易产生杂质从而影响合金纯净度,合金化过程中元素溶解控制难度大,金属粉末使用存在安全性和氧化等问题。此外,制备过程可能导致各向异性、塑性不足等问题。未来,一方面可以继续改进现有工艺以提高 Al-Li 合金锭料质量;同时还要探索新的制备技术,进一步探寻更有效的合金化途径,研究合金元素对 Al-Li 合金强韧性的影响机制以及多种微合金元素复合添加的作用机制。采用正交试验设计、响应曲面法等设计方法,系统研究不同元素组合和含量对 Al-Li 合金强韧性的影响规律,以进一步提升合金综合性能。

(3) 因表面改性技术引起的表面严重塑性变形形成的梯度层结构中析出相类型、数量、相貌及分布的变化规律及其对 Al-Li 合金的力学性能的影响与相关机制需要进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] 周璇. 2195Al-Li 合金热变形行为及挤压成型工艺研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- [2] 王一唱, 童鑫, 游国强, 等. Al-Li 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): 1 069-1 083.
- [3] 吴国华, 戚方舟, 张小龙, 等. 铸造 Al-Li 合金强韧化研究现状与展望[J]. 中国材料进展, 2022, 41(11): 869-879.
- [4] 邝泉波, 王日初, 彭超群, 等. Al-Li 合金制备及强韧化研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(8): 2 139-2 159.
- [5] 刘志鹏, 肖阳, 马凯杰, 等. 航空航天 Al-Li 合金开发及其研究进展[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(11): 8-17.
- [6] 李劲风, 郑子樵, 陈永来, 等. Al-Li 合金及其在航天工业上的应用[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(1): 13-19.
- [7] 冯朝辉, 于娟, 郝敏, 等. Al-Li 合金研究进展及发展趋势[J]. 航空材料学报, 2020, 40(1): 1-11.
- [8] 徐进军, 江茫, 熊纯. Al-Li 合金及其在航空航天领域成形技术的研究进展[J]. 热加工工艺, 2019, 48(24): 11-16.
- [9] 李红英, 汪冰峰. 航空航天用先进材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.
- [10] 黄晓敏, 管奔, 臧勇. 航空 Al-Li 合金热成形研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(12): 4 745-4 756.
- [11] 郑卓阳, 程仁赛, 肖栋, 等. Al-Li 合金的发展、特点与其在客机结构上的应用[A]// 2018 年中国铝加工产业年度大会[C]. 广东佛山, 2018.
- [12] 于娟, 冯朝辉, 李惠曲, 等. 2A97Al-Li 合金的化学铣切工艺研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53(2): 82-85.
- [13] 史国栋, 周俊, 王云峰, 等. X2A66Al-Li 合金时效过程中析出相演变及强化机制[J]. 固体火箭技术, 2020, 43(5): 618-623.
- [14] 王祝堂. 铝材在国产大飞机上的应用[J]. 轻合金加工技术, 2016, 44(11): 1-8.
- [15] ZOU C L, GENG G H, CHEN W Y. Development and application of aluminium-lithium alloy[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 599: 12-17.
- [16] 黄兰萍, 郑子樵, 李世晨, 等. Al-Li 合金的研究与应用[J]. 材料导报, 2002(5): 20-23.
- [17] QI M, CHEN C G, WEI J S, et al. Superior mechanical properties and microstructural evolution of powder metallurgy 2195 Al-Li alloy subjected to hot extrusion[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 962: 171 184.
- [18] LÜ P H, WANG R C, PENG C Q, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of 2195 Al-Li alloy processed by rapid solidification and thermo-mechanical processing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 948: 169 794.
- [19] 冯迪, 韩仲杰, 李吉臣, 等. 喷射成形 7055 铝合金初生相在形变前预热处理中的演变行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(12): 4 253-4 261.
- [20] PU Q Q, JIA Z H, KONG Y P, et al. Microstructure and mechanical properties of 2195 alloys prepared by traditional casting and spray forming[J]. Materials Science and Engineering, 2020, A784: 139 337.
- [21] JIA Y D, CAO F Y, GUO S, et al. Hot deformation behavior of spray-deposited Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Materials & Design, 2014, 53: 79-85.
- [22] DEVARAJ S, SANKARAN S, KUMAR R, et al. Influence of hot isostatic pressing on the microstructure and mechanical properties of a spray-formed Al-4.5Cu alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23: 1 440-1 450.
- [23] 甄萍. 8090Al-Li 合金的制备工艺及性能研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2016.
- [24] XIN M L, WANG Z D, LU B, et al. Effects of different process parameters on microstructure evolution and mechanical properties of 2060 Al-Li alloy during vacuum centrifugal casting[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 54-68.
- [25] 樊振中, 陆政, 张显峰, 等. 铸造 Al-Li 合金研究进展及应用趋势[A]//2014 中国铸造活动周[C]. 郑州, 2014.
- [26] 荣冕. Al-2Li-2Cu 铸造 Al-Li 合金精炼工艺研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [27] CUI J Z, ZHANG Z Q, LE Q C. DC casting of light alloys under magnetic fields[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(11): 2 046-2 050.
- [28] 严兆祥, 潘宇, 李建宇, 等. Al-Li 合金熔炼及凝固成形技术研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(12): 3 514-3 525.
- [29] 王复越. 低频电磁铸造 Al-Li 合金组织与力学性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2021.
- [30] LI J Y, LU S L, ZHAO D J, et al. Preparation of Mg₂Si/Al-Cu composite under a novel continuous squeeze casting-extrusion process assisted with ultrasonic treatment[J]. Materials Science and Engineering, 2023, A862: 144 469.
- [31] LI J Y, LI F, WU S S, et al. Variation of microstructure and mechanical properties of hybrid particulates reinforced Al-alloy matrix composites with ultrasonic treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 789: 630-638.
- [32] LI J Y, LU S L, WU S S, et al. Variation of microstructure and mechanical properties with nano-SiC_p levels in the nano-SiC_p/AlCuMnTi composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 769: 848-857.
- [33] LI J Y, PAN Y, YAN Z X, et al. Effects of Li content on microstructure evolution and mechanical properties of squeeze-cast Al-5Cu-xLi alloy assisted with ultrasonic treatment[J]. Journal of

- Alloys and Compounds, 2023, 961: 171-183.
- [34] 耿桂宏, 达道安, 郝维新, 等. 微重力电磁模拟制备高锂含量 Al-Li 合金[J]. 特种铸造及有色合金, 2003(2): 11-13.
- [35] 刘智伟. 铝锂母合金的制备[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- [36] SING S L, YEONG W Y. Laser powder bed fusion for metal additive manufacturing: perspectives on recent developments[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2020, 15(3): 359-370.
- [37] SONG B, DONG S J, DENG S H, et al. Microstructure and tensile properties of iron parts fabricated by selective laser melting[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 56: 451-460.
- [38] XIAO R S, ZHANG X Y. Problems and issues in laser beam welding of aluminum-lithium alloys[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2014, 16(2): 166-175.
- [39] ZHANG Y L, TAO W, CHEN Y B. Process, microstructures and mechanical properties of double-sided fiber laser beam welded T-joints of aluminum-lithium alloys 2060 and 2099[A]// International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics[C]. AIP Publishing, 2015.
- [40] 张新瑞. 2195Al-Li 合金激光选区熔化成形及裂纹缺陷调控[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [41] LI L, MENG X K, HUANG S, et al. Investigating the effect of the scanning speed on the characteristics of Al-Li alloy fabricated by selective laser melting [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 75: 719-728.
- [42] 刘丹阳, 汪洁霞, 李劲风, 等. Mg, Ag, Zn 微合金化 Al-Cu-Li 系 Al-Li 合金 T6 态时效的晶间腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2018, 38(2): 183-190.
- [43] LI J F, LIU P L, CHEN Y L, et al. Microstructure and mechanical properties 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): 2 103-2 112.
- [44] FU R, HUANG Y C, LIU Y, et al. Influence of homogenization treatment on microstructure and recrystallization behavior of 2195 Al-Li alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(8): 2 255-2 271.
- [45] WU G H, GUO Y J, QI F Z, et al. Role of alloying and heat treatment on microstructure and mechanical properties of cast Al-Li alloys: A review[J]. China Foundry, 2024, 21(5): 445-460.
- [46] SURESH M, SHARMA A, MORE A M, et al. Effect of Scandium addition on evolution of microstructure, texture and mechanical properties of thermo-mechanically processed Al-Li alloy AA2195 [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 740: 364-374.
- [47] 魏修宇, 郑子樵, 余玲娟, 等. Mg, Zn 在 2099Al-Li 合金中的微合金化作用[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(9): 1 583-1 587.
- [48] JIANG B, WANG H S, YI D Q, et al. Effect of Ag addition on the age hardening and precipitation behavior in an Al-Cu-Li-Mg-Zn-Mn-Zr alloy[J]. Materials Characterization, 2020, 162: 110-184.
- [49] ZHANG X J, WANG H W, ZOU C M, 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): 11 069-11 079.
- [50] 赵和安, 胡丽敏, 李爱文, 等. Ce 含量对 2195Al-Li 合金组织及性能的影响[J]. 航天制造技术, 2023(2): 27-31.
- [51] 黄天顺, 李鹏鹏. Al-Li 合金 2090-T83 的合金化研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(10): 57-59.
- [52] 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.
- [53] PRASAD K S, PRASAD N E, GOKHALE A A. Aluminum-lithium Alloys[M]. Amsterdam: Elsevier, 2014.
- [54] 刘榕英. 2A97Al-Li 合金微观组织调控与性能优化[D]. 福州: 福州大学, 2022.
- [55] CHUNG T, YANG Y, HSIAO C, et al. Morphological evolution of GP zones and nanometer-sized precipitates in the AA2050 aluminium alloy[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2018, 1(3): 142-156.
- [56] DORIN T, DESCHAMPS A, DE GEUSER F, et al. Impact of grain microstructure on the heterogeneity of precipitation strengthening in an Al-Li-Cu alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2015, A627: 51-55.
- [57] 赵彤, 张翌, 马鹏程, 等. 时效温度对 Al-Li 合金组织及性能影响研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2019, 38(3): 30-33.
- [58] BLANKENSHIP JR C P, HORNBOGEN E, STARKE JR E A. Predicting slip behavior in alloys containing shearable and strong particles[J]. Materials Science and Engineering, 1993, A169(1-2): 33-41.
- [59] 胡恬娇, 叶凌英, 董宇, 等. 晶粒组织对 2195Al-Li 合金应力时效析出行为与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(9): 3 230-3 238.
- [60] LI F D, LIU Z Y, WU W T, et al. Slip band formation in plastic deformation zone at crack tip in fatigue stage II of 2xxx aluminum alloys[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 91: 68-78.
- [61] 郭幼节, 张亮, 吴国华, 等. Al-Li 合金纳米析出相对力学性能各向异性影响的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(8): 2 371-2 384.
- [62] DORIN T, DESCHAMPS A, GEUSER D F, et al. Quantification and modelling of the microstructure/strength relationship by tailoring the morphological parameters of the T_1 phase in an Al-Cu-Li alloy[J]. Acta Materialia, 2014, 75: 134-146.
- [63] 李劲风, 宁红, 刘丹阳, 等. Al-Cu-Li 系 Al-Li 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.
- [64] 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): 4 381-4 393.
- [65] PETERS V A, GAULT B, GEUSER D F, et al. Microstructural evolution during ageing of Al-Cu-Li- x alloys[J]. Acta Materialia, 2014, 66: 199-208.
- [66] 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, 2020, A782: 139-253.
- [67] QI F Z, TONG X, WU G H, et al. Revealing the substantial impact of trace Mg addition on the microstructural configuration of a cast Al-Li-Cu-Zr alloy under various conditions[J]. Materials Characterization, 2024, 217: 114-428.
- [68] WANG X M, LI G A, JIANG J T, et al. Influence of Mg content on ageing precipitation behavior of Al-Cu-Li- x alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A742: 138-149.
- [69] EVA G, WILLIAMS L, GEUSER D F, et al. The effect of minor solute additions on the precipitation path of an AlCuLi alloy [J]. Acta Materialia, 2016, 115: 104-114.
- [70] EVA G, FRÉDÉRIC D G, CHRISTOPHE S, 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.
- [71] 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): 11 121-11 134.
- [72] XU X X, WU G H, ZHANG L, et al. Regulation of precipitation behavior among T_1 , S' , and θ' phases in Al-Cu-Li-(Mg-Ag) alloys by optimizing Ag/Mg ratios[J]. Materials Science and Engineering, 2023, A876: 145 158.
- [73] 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: 110 089.
- [74] LIU D Y, MA Y L, LI J F, et al. The influence of Zn addition on microstructure of an Al-1.7Cu-4.0Li-0.4Mg alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(2): 2 423-2 439.
- [75] 罗先甫, 郑子樵, 钟继发, 等. Mg、Ag、Zn多元微合金化对新型 Al-Cu-Li 合金时效行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(7): 1 833-1 842.
- [76] GUMBMANN E, GEUSER F D, 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.
- [77] 桑冯建, 郑子樵, 王海金. Mn 在 2297Al-Li 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.
- [78] DENG S X, LI J F, NING H, et al. Effect of Zr addition on the microstructure evolution and mechanical properties of extruded Al-Cu-Li-Mn alloys [J]. Materials Characterization, 2023, 202: 113 011.
- [79] KARLÍK M, MÁNIK T, LAUSCHMANN H. Influence of Si and Fe on the distribution of intermetallic compounds in twin-roll cast Al-Mn-Zr alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 515: 108-113.
- [80] CHEN A T, ZHANG L, WU G H, et al. Influences of Mn content on the microstructures and mechanical properties of cast Al-3Li-2Cu-0.2 Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 715: 421-431.
- [81] 陈志国, 周娴, 舒军, 等. 稀土在铝合金中微合金化研究进展[J]. 矿冶工程, 2010, 30(2): 102-106.
- [82] MA J, YAN D S, RONG L J, et al. Effect of Sc addition on microstructure and mechanical properties of 1460 alloy [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2014, 24(1): 13-18.
- [83] RIDDLE Y W, SANDERS T H J. Recrystallization performance of AA7050 varied with Sc and Zr[A]//Materials Science Forum[C]. Swetland: Trans. Tech. Publ., 2000.
- [84] LI C L, LI X W, ZHANG Y G, et al. Effect of Sc content on microstructure characteristics and evolution of W phase in Al-Cu-Li alloys under as-cast and homogenization conditions[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 7 335-7 352.
- [85] DING X X, LU Y L, WANG J, et al. Effect of Ce content on the microstructure and mechanical properties of Al-Cu-Li alloy[J]. Metals, 2023, 13(2): 253.
- [86] 朱庆丰, 王浩, 高扬, 等. 固溶温度对 2050Al-Li 合金挤压棒材组织和性能的影响[J]. 材料工程, 2023, 51(11): 71-78.
- [87] 马子博, 郭亚杰, 牛凤姣, 等. 细晶 2A97Al-Li 合金的固溶制度研究[J]. 热加工工艺, 2023, 52(12): 21-27.
- [88] ZHOU J, MIAO J H, WANG B Y, et al. Effect of solution treatment and aging treatment on mechanical properties of 2060 Al-Li alloy and process multi-objective optimization[J]. Metals, 2022, 12(6): 897.
- [89] ZHANG S, QI F Z, ZHANG L, et al. Effect of aging treatment on high temperature mechanical properties of a cast Al-Li-Cu alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2024, A896: 146 300.
- [90] DUAN S W, LIU Z L, GUO F Q, et al. Precipitates evolution during artificial aging and their influence on mechanical properties of a cast Al-Cu-Li alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 22: 2 502-2 517.
- [91] 王志文, 杨荣东, 黄元春, 等. 时效处理对挤压成型 2195Al-Li 合金组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(9): 6-11.
- [92] XIE B X, HUANG L, XU J H, et al. Effect of the aging process and pre-deformation on the precipitated phase and mechanical properties of 2195 Al-Li alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2022, A832: 142 394.
- [93] XU J U, DENG Y L, CHEN J Q, et al. Effect of ageing treatments on the precipitation behavior and mechanical properties of Al-Cu-Li alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2020, A773: 138 885.
- [94] 李劲风, 陈永来, 张绪虎, 等. 非等温时效对一种 Al-Li 合金力学性能与微观组织的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(1): 183-188.
- [95] LI Y, XU G F, PENG X Y, et al. Research on microstructure and mechanical properties of 2050 Al-Li alloy during non-isothermal aging[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 906: 163 977.
- [96] 张义俊, 姚国林, 郭晓光, 等. 时效和预变形对 2195Al-Li 合金组织与性能的影响[J]. 锻压技术, 2023, 48(1): 216-221.
- [97] 魏辽, 刘志义, 于迪尔, 等. 预变形对 Al-4.28Cu-1.33Li-0.40Mg-0.30Ag-0.14Zr 合金时效组织与性能的影响[J]. 矿冶工程, 2021, 41(1): 106-109.
- [98] 谢冰鑫, 黄亮, 徐佳辉, 等. 2195Al-Li 合金时效析出行为与强化机理[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(8): 2 160-2 172.
- [99] CHEN W B, XIAO D H, WU M D, et al. Effect of cold rolling pre-deformation on microstructure and properties of V-1469 Al-Li alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5): 9 675-9 683.
- [100] 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.
- [101] WANG Y X, MA X W, XI H K, et al. Effects of pre-stretching and aging treatments on microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior of spray-formed Al-Li alloy 2195[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29: 6 960-6 973.
- [102] 徐佳辉, 黄亮, 谢冰鑫, 等. Al-Li 合金电磁形变复合热处理工艺研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(16): 58-67.
- [103] XIE B X, HUANG L, XU J H, et al. Microstructure evolution and strengthening mechanism of Al-Li alloy during thermo-electromagnetic forming process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 315: 117 922.
- [104] ZHANG L W, LI H, BIAN T J, et al. Advances and challenges on springback control for creep age forming of aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(10): 8-34.
- [105] 张力文. 初始状态对 Al-Li 合金蠕变时效行为的影响及其机制[J]. 有色金属工程, 2024, 14(7): 68-72.
- [106] HAN J Q, WANG H M, XU A J, et al. Enhanced matrix precipitation of T_1 (Al_2CuLi) phase in AA2055 Al-Li alloy during stress aging process[J]. Materials Science and Engineering, 2021, A827: 142 057.