

引用格式: 郑皓, 杨健, 寇飞行. 铝锂合金薄板在国内航空领域的工程化应用与展望[J]. 中国材料进展, 2025, 44(2): 193–198.  
ZHENG H, YANG J, KOU F X. Engineering Application and Prospect of Aluminum-Lithium Alloy Sheet in Domestic Aviation Field[J]. Materials China, 2025, 44(2): 193–198.

# 铝锂合金薄板在国内航空领域的工程化应用与展望

郑 皓, 杨 健, 寇飞行

(中国航空工业集团公司第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089)

**摘 要:** 铝锂合金具有高的比强度、比刚度, 及优良的耐损伤特性, 在航空航天领域具有取代 2××× 和 7××× 铝合金的应用潜力, 在飞机设计中获得高减重效益, 因而在飞机选材中备受瞩目。介绍了国内制造的飞机及零部件所应用的各种铝锂合金薄板的研制历程、主要特点及应用部位, 描述了铝锂合金薄板在国内主机厂的应用现状及当前应用存在的问题, 尤其是制造工艺中的困难。从飞机选材角度出发, 列举了国内外铝锂合金先进制造工艺的应用, 展望了未来国内铝锂合金的研发思路及急需攻关的问题, 为今后铝锂合金在我国航空领域的应用研发提供参考。

**关键词:** 铝锂合金; 航空; 薄板; 应用; 制造工艺

中图分类号: TG146.21 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2025)02-0193-06

## Engineering Application and Prospect of Aluminum-Lithium Alloy Sheet in Domestic Aviation Field

ZHENG Hao, YANG Jian, KOU Feixing

(The First Aircraft Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** Aluminum-lithium alloy has high specific strength, high specific stiffness and excellent damage-tolerance. It has the potential to replace 2××× and 7××× aluminum alloys in the aerospace field, and provides high weight loss benefits in the aircraft design. Aluminum-lithium alloy has attracted much attention in the aircraft material selection. In this paper, we introduce the development history, main characteristics and application parts of various aluminum-lithium alloy sheets for aircraft and parts manufacturing in China, and illustrate the application status of aluminum-lithium alloy sheet in domestic mainframe factory, including the existing problems in the current application, especially the difficulties in the manufacturing process. The advanced manufacturing technology of aluminum-lithium alloy parts at home and abroad is listed from the angle of aircraft material selection. Finally, the future research and development of aluminum-lithium alloy in China are prospected. It provides a reference for the application research of aluminum-lithium alloy for aviation field in the future.

**Key words:** Al-Li alloy; aviation; sheet; application; manufacturing technology

### 1 前 言

铝锂合金因具有比传统铝合金更优异的性能, 比如密度更低、比强度和比刚度更高等特性, 在对重量和力学性能具有严苛要求的航空航天和军事领域受到了广泛关注。Li 元素的加入能够直接影响合金的密度和弹性模量, 使得铝锂合金具有出色的性能。Li 是世界上最轻的金属, 当铝合金中加入质量分数 1% 的 Li 元素时, 合金

密度下降约 3%, 弹性模量提升约 6%<sup>[1]</sup>。近些年研发了 2098/2198、2050、2099/2199 等新一代铝锂合金, 相比于第二代铝锂合金, 新一代铝锂合金具有高热稳定性和高损伤容限性等优势, 在航空航天领域备受关注<sup>[1, 2]</sup>。例如, 对 2050 铝锂合金进行热暴露实验, 结果表明, 经过 85 °C 长时间(1000 h)的热暴露, 合金的屈服强度保持稳定, 韧性也无明显下降<sup>[3]</sup>; 许罗鹏等<sup>[4]</sup>发现 2198-T8 铝锂合金具有较强的抗疲劳性能。将铝锂合金应用在飞机结构中, 在不改变零件几何尺寸的前提下, 即可有效减轻飞机的结构重量, 使得铝锂合金具有广阔的应用前景。因此, 国内外航空领域都把除复合材料以外的结构材料选材瞄准了铝锂合金, 材料研制单位也根据这种需

收稿日期: 2023-02-25 修回日期: 2024-04-29

第一作者: 郑 皓, 男, 1990 年生, 工程师,

Email: 540042936@qq.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202302023

求开展了大量研究工作，从而形成了系列铝锂合金成分和制备技术。

2 国内铝锂合金薄板应用现状

当前国内飞机结构材料中，大量应用的铝锂合金薄板的牌号主要有 5A90、2198、2060、2A97。国内应用的第三代铝锂合金薄板与国内航空领域广泛应用于飞机蒙

皮的 2024 铝合金薄板性能特点比较如表 1 所示，相比于传统 2024 铝合金，铝锂合金具有低密度、高弹性模量、优异的耐蚀性能和良好可焊接性，2A97 和 2060 合金的耐损伤性能与 2×24 系列合金中耐损伤性能最好的 2524 合金相当，在国内航空领域正逐步替代传统 2024 铝合金薄板的应用。

表 1 国内应用的典型牌号铝锂合金薄板与 2024 铝合金薄板性能特点比较

Table 1 Performance comparison of aluminum-lithium alloy sheet brands used at home and 2024 aluminum alloy sheet

牌号	2A97	2060	2198	2024
生产国家	中国	美国	美国	中国
密度及模量	$E\geq 77\text{ GPa}$ , $\rho\leq 2.67\text{ g/cm}^3$	$E\geq 74\text{ GPa}$ , $\rho\leq 2.72\text{ g/cm}^3$	$E\geq 75\text{ GPa}$ , $\rho\leq 2.68\text{ g/cm}^3$	$E\geq 70\text{ GPa}$ , $\rho\leq 2.78\text{ g/cm}^3$
规格	0.8~4.0 mm	1.6~8.0 mm	1.6~6.3 mm	0.2~6.37 mm
状态	T3,T6,T8	T8E30	T3S,T8	O,T3,T4,T6
耐损伤性能	耐损伤性能与 2524 相当			
成形制造工艺	拉弯、滚弯、钣金成形	滚弯成形	落压、滚弯成形	拉弯、滚弯、钣金成形
耐蚀性能	无晶间腐蚀 剥蚀 EA 级	无晶间腐蚀 剥蚀 EA 级	无晶间腐蚀 剥蚀 EB 级	晶间腐蚀 3~4 级; 剥蚀 EB 级
可焊接性能	熔焊、搅拌摩擦焊接	熔焊、搅拌摩擦焊接	熔焊、搅拌摩擦焊接	不可熔焊

2.1 5A90 合金

1965 年，前苏联科学家 Fridlyander 等<sup>[5]</sup>发现了 Al-Mg-Li 系铝锂合金的析出强化特性，随后成功研制了 1420 合金。该合金名义成分为 Al-5.5Mg-2.1Li-0.11Zr，是目前密度最低的商用铝合金（密度仅为 2.47 g/cm<sup>3</sup>）。该合金的弹性模量较高（ $E\geq 75\text{ GPa}$ ），焊接性能、耐热性能和耐腐蚀性能较好<sup>[6]</sup>，但各向异性较明显以及屈服比较低等特性限制了该合金大规模应用。该合金已应用于雅克-36、米格-29、苏-27、苏-35、米格-33、安-70T 等军用飞机以及图-204 客机<sup>[7,8]</sup>。

“十五”期间，我国和俄罗斯合作，引进 1420 合金进行研究并仿制，西南铝建成了 1 t 级半连续熔铸机组，实现了小规格板材和型材的生产，随后开发出 5A90 铝锂合金，各项性能上近似 1420 合金<sup>[9]</sup>。

5A90 合金由西南铝生产，材料供应状态为 T3S，板材宽度为 1200 mm，板材厚度  $\delta$  为 1.0~3.0 mm，轧制方法为片式制备，薄板及型材应用于国内某型号飞机蒙皮、垂尾、长桁的制造。5A90 合金制造的蒙皮零件包括等直段和双曲段，成形方法涉及滚弯、落压及拉伸 3 种。单曲度零件由 T3S 状态下直接滚弯成形，成形效果良好。原材料可进行淬火热处理，热处理方式为硝酸盐水淬，通常允许重复热处理 5 次，其主要目的是软化材料、提高塑性、消除应力，落压成形零件及拉伸成形零件均采

用淬火后成形的工艺方法。其中落压成形最佳成形时间为 0.5 h 以内，该时间由材料的特性所决定，时间过长零件容易开裂；弧度平缓、尺寸小（最大零件尺寸为 1200 mm×600 mm）且淬火变形小的极少数零件采用拉伸成形，但也存在较多问题。

2.2 2198 合金

为取代 2024 及 2524 铝合金，2005 年美国 Alcoa 公司研制成功 2198 铝锂合金，成功应用于庞巴迪 C 系列、空客 A350、A380 等飞机的蒙皮<sup>[10]</sup>。该合金的成分设计是基于 2098 合金的化学成分，添加 1%~2% 的 Li 元素和起稳定作用的 Cu，Ag，Mg，Zr，Zn 等元素<sup>[11]</sup>。作为新型的第三代轻质高强铝锂合金，相比于同样是第三代铝锂合金的 2197 合金，2198 合金具有更低的 Li 含量，增加了 Cu 含量。2198 合金密度比传统低密度铝合金低 5%~8%，而弹性模量要高 4%~6%；疲劳性能优良，断裂韧性等于或优于传统铝合金；耐应力腐蚀开裂的极限应力水平比传统的 2×××和 7×××铝合金高出 70~140 MPa；加工制造特性与传统的 2×××和 7×××铝合金相似，可搅拌摩擦焊。

目前铝锂合金应用量最大的飞机是庞巴迪 C 系列飞机，除中后机身外，其余机身结构全面采用铝锂合金，机身材料用量的 23% 为新型铝锂合金<sup>[12]</sup>，其中 2198 合金薄板选用了 7 个规格（厚度 1.0，1.2，1.5，1.8，2.0，

2.5, 3.0 mm), 供应状态有 T3S 和 T8 2 个状态, 最终热处理至 T82 态。庞巴迪 C 系列飞机 2198 合金蒙皮的成形原来一直由庞巴迪公司完成, 2017 年开始转到沈飞民机公司生产, 所使用的 2198 合金薄板由 Constellium 生产。蒙皮类零件采用落压及滚弯 2 种成形工艺, 制造的蒙皮包含等直段和双曲段。双曲成形的蒙皮由庞巴迪完成制造, 左右两侧各有 2 件机身蒙皮, 采用 2.0 mm 厚薄板滚弯成形, 尺寸为 4800 mm×1800 mm, 最大规格滚弯成形蒙皮达 6000 mm 长。

### 2.3 2060 合金

2011 年巴黎航展上, 美国 Alcoa 公司首次公开报道了为现代民航飞机设计的 2060 合金<sup>[13]</sup>。2060 合金属于 Al-Cu-Li-Mg-Ag 系合金, 相比于其他铝锂合金, 为促进主要强化相  $T_1$  ( $Al_2CuLi$ ) 的析出, 使其在 Al 基体中大量地弥散分布, 在成分设计上提高了 Cu/Li 的比例。此外合金中还有  $\theta'$  ( $Al_2Cu$ )、 $\delta'$  ( $Al_3Li$ ) 及少量的  $T_2$  ( $Al_6CuLi_3$ ) 和  $S'$  ( $Al_2CuMg$ ) 等相, 多种类型的小尺寸析出相提高了 2060 合金的强度<sup>[14-16]</sup>。Ag 元素的加入则对合金的时效析出强化效应造成较大影响, 改变了 Al-Cu-Li 合金的时效析出过程, 促进  $\theta'$ 、 $T_1$  及  $S'$  等相的均匀细小析出, 提高了合金强韧性<sup>[17]</sup>。2060 合金具有高强度的同时, 兼顾了其他力学性能, 尤其是高损伤容限、低各向异性和高的可焊接性能。该合金应用的主要目标是替代传统 2××× 和 7××× 铝合金, 实现预期的减重、延寿效果<sup>[18]</sup>。

2060 合金薄板主要应用部位是 C919 飞机的机身壁板。C919 飞机是我国按照 FAA 最新适航标准、第一次大范围应用铝锂合金的商用飞机。2060 合金薄板应用部位包括整个前机身壁板和中机身的上壁板。C919 应用的铝锂合金为美国 Alcoa 公司生产的 T8E30 状态 2060 薄板, T8E30 制度是在传统 T8 工艺(固溶+冷作硬化+人工时效)基础上发展的特殊热处理工艺技术, 以获取良好的综合性能。供货规格最厚 6.0 mm, 最薄为 2.0 mm, 材料出厂时经过抛光处理, C919 飞机上 2060 合金制造的蒙皮仅包含等直段, 零件均为单曲成形。由美国 Alcoa 公司提供的 2060 合金制造出的 C919 客机的机身等直段全长 7450 mm、宽 4200 mm、高 4200 mm, 是 C919 客机七大部分之一。

### 2.4 2A97 合金

针对第一、二代铝锂合金各向异性明显、塑韧性较低等问题, 中南大学、西南铝、北京航空材料研究院等单位联合开展了“一型两用”轻质可焊接 2A97 铝锂合金研制工作, 铸造出 400 mm×1350 mm 大规格方铸锭, 研制开发出厚板、薄板以及型材等主要品种, 工业化试制的 2A97 薄板具有优良的拉伸、断裂、抗疲劳裂纹扩展及

焊接性能<sup>[19]</sup>。2A97-T84 型材具有较高的强度和塑性, 抗拉强度 $\geq 530$  MPa, 延伸率达到 8% 以上。该材料是我国自主研发的第三代铝锂合金, 它的出现标志着我国铝锂合金熔铸技术、成分控制方面已经较为成熟。

2A97 合金薄板应用在某型号机身前下壁板、中侧壁板和后下壁板。西南铝可提供 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 mm 厚的 2A97-H14 薄板, 采用 2000 mm 幅宽薄板卷式生产工艺, 经制造厂固溶和变形后, 时效至 T3 或 T42 状态。成形工艺包括直筒段滚弯、拉伸成形等工艺, 完成单曲面蒙皮和双曲蒙皮制造, 连接工艺为铆接。

## 3 应用存在问题及解决措施

由于铝锂合金室温塑性较低、屈强比高、冷作硬化速率快等特性, 给航空制造厂制造大规格复杂零件带来很大困难。

### 3.1 5A90 合金

(1) 5A90 板材轧制方法为片式制备, 板材板形无法控制; 原材料表面质量差, 存在色斑、条纹等。

(2) 5A90 合金材料脆性高、塑性差, 在拉伸成形过程中, 有裂纹和断裂现象发生, 零件成形成品率低。

(3) 5A90 合金化铣零件保护胶选用 AC850 牌号, 存在化铣后分离零件保护胶揭胶困难问题。部分零件化铣后出现沿轧制方向的腐蚀坑和夹杂等组织缺陷, 化铣后零件报废; 化铣后表面光洁度差。

### 3.2 2198 合金

2198 铝锂合金板材色差较为均匀, 板材基本上无明显黑色轧制条纹, 但有色斑; 已成形的 2198 合金零件经碱洗后需对表面进行打磨, 以消除色差, 部分零件经打磨后厚度超差, 引起报废。

### 3.3 2060 合金

2060 合金的裂纹扩展试验结果中, 表征疲劳寿命的剩余强度值分散性较大, 在要求长疲劳寿命的民机上应用存在风险。针对该情况, 美国 Alcoa 公司专家现场观看试验情况后认为是阳极化处理影响了材料性能。

### 3.4 2A97 合金

#### 3.4.1 焊接

2A97 合金激光焊接虽然焊缝达到一级焊缝, 但气孔也较明显, 如图 1 所示, 同时焊接系数最多达到 0.7, 很难满足高强度和高抗腐蚀性能的要求。



图1 2A97 合金激光焊焊缝

Fig. 1 Laser welding seam of 2A97 alloy



### 3.4.2 表面缺陷

2A97 合金薄板表面原始缺陷可分为 2 大类: 表面黑色条纹及微轧伤条带, 如图 2 所示。原材料表面存在贯穿整个板面的黑条纹, 经热处理后该条纹依然存在, 变为灰白色。

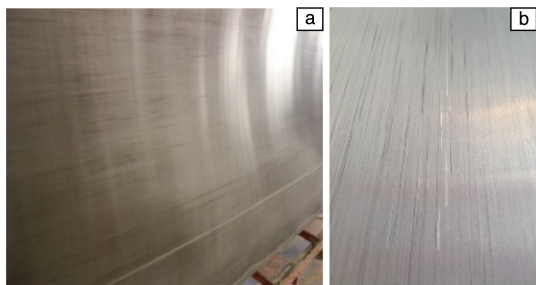


图 2 2A97 薄板表面缺陷: (a) 黑色条纹, (b) 微轧伤条带  
Fig. 2 Surface defects of 2A97 alloy sheet: (a) black stripes, (b) microbruising

对表面缺陷进行检测分析, 得到以下结果:

(1) 表面黑色条纹以及微轧伤条带均呈现细小的凹坑形貌, 初步判断这 2 类表面缺陷均是由轧制过程中板材表面粘伤形成, 黑色条纹深度约  $2\ \mu\text{m}$ , 微轧伤条带深度在  $7\ \mu\text{m}$  左右;

(2) 黑色条带主要由富 C、O 元素的附着物构成, 说明是有机物高温氧化形成, 符合润滑油氧化后的成分;

(3) 纵、横向的金相组织表明, 黑色条带区域热处理后并不存在异常组织;

(4) 黑色条带不影响热处理后的拉伸性能。

### 3.4.3 板材淬火及成形

当前 2A97 铝锂合金薄板蒙皮的制造工艺分为 2 种, 单曲蒙皮的制造采用滚弯成形工艺, 双曲蒙皮的制造采用拉伸成形工艺, 其成形方法与常规铝合金蒙皮相近。单曲蒙皮的制造工艺较为成熟, 而双曲蒙皮制造工艺难度较大, 合格率较低。经分析, 双曲蒙皮成形工艺的主要难点有以下 3 方面。

(1) 材料淬火孕育期短, 冷作硬化速率快, 成形难度大

2A97 铝锂合金板材淬火后最佳成形时间为 0.5 h 以内, 而实际应用中, 在 0.5 h 内难以进行零件成形。材料从淬火出炉到拉伸成形要经过清洗、出框、转移、修边、装夹等多个环节, 至少需要 50 min 以上, 使得零件成形难度大幅度提高。

(2) 热处理变形大

板材在淬火出炉后, 局部变形大(图 3), 在拉伸机上进钳口困难; 在拉伸时, 大变形容易延板面向内部延伸, 形成死折。

(3) 材料流动性差, 缺陷多, 难以成形

铝锂合金材料流动性差, 零件拉伸成形中局部缺陷

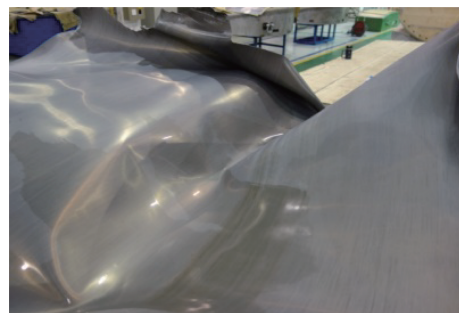


图 3 2A97 薄板淬火变形  
Fig. 3 Quenching deformation of 2A97 alloy sheet

仅能通过及时修整进行处理。对于带上盖拉伸成形的蒙皮零件, 上下模之间材料的流动更加困难, 现场无法进行修复处理, 容易形成褶皱、波浪、凹陷、鼓包等缺陷(图 4)。较为严重的褶皱无法消除, 导致零件成形失败。

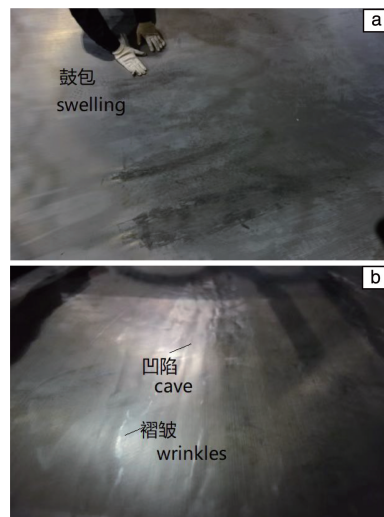


图 4 2A97 薄板拉伸成形后的鼓包、凹陷、褶皱等缺陷  
Fig. 4 Defects of swelling, cave and wrinkles during 2A97 alloy sheet tension fabrication

### 3.4.4 化铣除胶

铝锂合金在化铣过程中, 合金中的金属元素存在不同的电极电位, 电位差导致各金属原子反应速率存在差异, 锂元素化铣腐蚀速率远远大于铝元素的腐蚀速率, 故化铣后合金表面出现密集点蚀坑缺陷, 使得表面粗糙度增加, 试板及试验件化铣后表面有“凸岛”, 如图 5 所示。此问题使得化铣保护胶与 2A97 合金试板之间的结合力高达 0.17 MPa, 严重影响生产效率。

## 4 发展与展望

铝锂合金薄板室温塑性较低, 成形易出现缺陷。在航空领域中, 我国在铝锂合金的生产与应用方面取得长足发展, 但与欧美, 甚至俄罗斯仍有不小差距, 尤其是



图5 化铣后的“凸岛”现象

Fig 5 Bulge island defect in chemical milled alloy sheet

在薄板制造方面面临诸多困难, 限制了大规格铝锂合金在航空领域的应用。一些适用于铝锂合金的现代结构制造工艺, 如激光焊接、搅拌摩擦焊、超塑成形技术, 可以进一步发挥优势, 扩大铝锂合金的应用范围。在铝锂合金开发及进一步拓展其在航空制造领域应用方面, 亟需在以下方面加大研究。

(1) 合金成分、均匀化、固溶工艺、时效工艺、外加物理能量场等因素均影响第二相析出行为, 其主要析出相的种类、形貌、尺寸、体积分数、析出位置、演变行为、与基体的共格关系均对材料的力学性能产生影响<sup>[17, 20-22]</sup>。综合材料学、数据驱动冶金学等理论, 进行合金成分设计及优化, 调控微观组织, 加强对铝锂合金熔铸工艺研究, 根据合金体系及其主成分作用的研究结果, 设计出既能满足设计需求, 又能降低制造难度的合金。走出对欧美、俄罗斯的跟踪研究状态, 最终建立具有自主知识产权的新一代铝锂合金体系。

(2) 加强对热处理工艺、热成形工艺及超塑成形工艺的研究, 特别是高温塑性变形工艺与变形组织之间关系, 探索铝锂合金加工硬化和热变形软化机制, 解决铝锂合金加工变形缺陷多、易开裂等问题。铝锂合金超塑成形已继钛合金超塑成形研究高潮后引起了人们很大的兴趣, 并已经在航空领域结构零件制造中展现了显著的优势。英国通过超塑成形工艺制造了 8090 铝锂合金的战斗机起落架舱门, 节约飞机制造成本达到 56%, 结构减重达到 20%; 日本利用超塑成形技术制造出飞机用隔板门整体成形件; 美国麦道公司采用超塑成形工艺制造 F-15B 的双曲面整流罩, 长 3660 mm、宽 406 mm、高 305 mm, 替代由 1 个铸件和 2 个钣金件装配而成的部件; 俄罗斯采用超塑成形工艺制造了 1420 合金飞机零部件, 一些零件尺寸达 1200 mm×600 mm<sup>[23]</sup>。国外通过等通道角挤压技术的大变形方法细化 1420 铝锂合金的晶粒组

织, 晶粒尺寸可达 0.4 ~ 1.6  $\mu\text{m}$ , 在 330  $^{\circ}\text{C}$ 、 $3.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  的变形条件下制造出整体壁板零件<sup>[24]</sup>。国内西南铝业与中南大学合作研发出了超塑性铝锂合金薄板, 尺寸为 2000 mm×1200 mm×2 mm<sup>[25]</sup>。中国航空制造技术研究院利用超塑成形工艺成功制造出 2091 铝锂合金零件, 该零件应用于国产某型号歼击机前机身内蒙皮酒精箱口盖, 有效地解决了原来采用 LY12 铝合金落压成形出现的表面褶皱、粗晶、微裂纹等表面缺陷问题, 提高了零件的表面质量<sup>[26]</sup>。

(3) 加大铝锂合金焊接工艺与焊后工艺的研究和积累, 并形成体系化的工艺规范。国内由于研究薄弱, 极大限制了铝锂合金焊接工艺的应用。欧美的飞机制造商及焊接领域广泛研究激光焊接、搅拌摩擦焊等工艺。激光焊接是制造飞机机身壁板最有潜力的工艺, 因为其具有低热量消耗和窄的焊缝、加工速度快以及高度自动化的特点。欧洲空客公司和德国 Fraunhofer 材料与射线研究所(IWS)、德国不莱梅射线技术研究所(BIAS)、西班牙托雷斯公司(M. Torres)、德国舒勒公司(Schule Held)等科研院所和企业合作开发双侧激光同步焊接系统, 可以实现对不同结构尺寸的高强可焊铝合金或者铝锂合金的机身壁板结构双侧激光同步焊接<sup>[27, 28]</sup>。其中利用  $\text{CO}_2$  激光同步焊接系统已经实现对 A350 客机 2198 铝锂合金机身蒙皮-桁条结构的激光焊接<sup>[29]</sup>。搅拌摩擦焊可以避免铝锂合金气孔、凝固裂纹和因 Li 损失而导致的焊缝强度降低, 已经成为国外制造飞行器部件与结构的一种重要方法。通过搅拌摩擦焊制造的 A340-600 的 2050 铝锂合金翼肋, 实现减重 5%, 成本降低 21%<sup>[30]</sup>。

## 5 结 语

飞机设计中的材料和材料相关工艺的选择是一项复杂的任务, 直接比较铝合金和复合材料的性能是不可行的, 性能和设计准则也有很大差别, 要进行详细分析和权衡研究。这些工作还要与制造工艺评估、供应链战略以及全寿命周期成本模型结合在一起, 最终决定材料的选择。面对复合材料等新型航空结构材料对传统航空用铝合金材料的竞争, 铝锂合金在减重和降低生产、加工和维修成本等方面具有优势。此外, 在某些特种飞机的选材中, 要考虑机身壁板应具有电磁屏蔽功能, 若采用复合材料, 要增加相应涂层进行电磁屏蔽处理, 这会抵消密度减小带来的收益。未来我国飞机型号的研制, 急需我国新一代铝锂合金的工程化应用。

## 参考文献 References

- [1] 郑子樵, 李劲风, 李红英, 等. 新型铝锂合金的研究进展与应用 [C]// 中国有色金属学会第十四届材料科学与合金加工学术年会

- 论文集. 北京: 中国有色金属学会材料科学与工程学术委员会, 2011: 6-14.
- ZHENG Z Q, LI J F, LI H Y, *et al.* Research Progress and Application of New Aluminum-Lithium Alloys[C]// Proceedings of the 14th Annual Conference on Materials Science and Alloy Processing of the Nonferrous Metals Society of China. Beijing: Academic Committee on Materials Science and Engineering of the Nonferrous Metals Society of China, 2011: 6-14.
- [2] 尹登峰, 郑子樵. 材料导报[J], 2003, 17(2): 18-20.
- YIN D F, ZHENG Z Q. Materials Reports[J], 2003, 17(2): 18-20.
- [3] 钟警. 2050 铝锂合金耐损伤性能的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- ZHONG J. Damage Resistance Behavior of 2050 Aluminum Alloy [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [4] 许罗鹏, 曹小建, 李久楷, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2017, 46(1): 83-89.
- XU L P, CAO X J, LI J K, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2017, 46(1): 83-89.
- [5] FRIDLYANDER I N, KOLOBNEV N I, BEREZINA A L, *et al.* The Effect of Scandium on Decomposition Kinetics in Aluminum-Lithium Alloys [M]//PETERS M, WINKLER P J. Aluminum-Lithium Alloys VI. Germany: DGM Informationsgesellschaft MBH, 1992: 107-112.
- [6] PRASAD N E, GOKHALE A, WANHILL R. Aluminum-Lithium Alloys: Processing, Properties, and Applications[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.
- [7] FRIDLYANDER I J. Metal Science and Heat Treatment[J], 2001, 43(1): 6-10.
- [8] 杨守杰, 陆政, 苏彬, 等. 材料工程[J], 2001(5): 44-47.
- YANG S J, LU Z, SU B, *et al.* Journal of Materials Engineering[J], 2001(5): 44-47.
- [9] 汤炜. 5A90 铝锂合金薄板成形工艺研究[D]. 太原: 中北大学, 2008.
- TANG W. The Appliance Research in the Shapping-Performance of 5A90 Al-Li Alloy Sheet [D]. Taiyuan: North University of China, 2008.
- [10] 峻峰译. 世界有色金属[J], 2011(6): 66-68.
- Translated by JUN F. World Nonferrous Metals[J], 2011(6): 66-68.
- [11] 王祝堂. 轻合金加工技术[J], 2012, 40(6): 15.
- WANG Z T. Light Alloy Fabrication Technology [J], 2012, 40(6): 15.
- [12] 李华冠. 新型铝锂合金的热处理工艺及淬火态成形性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- LI H G. Heat Treatment and Forming Performance after Quenching of a New Aluminum-Lithium Alloy [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [13] 张溪龙. 铝锂合金机身壁板结构激光焊接特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- ZHANG Y L. Study on the Characteristics of Laser Beam Welding for Aluminum-Lithium Alloy Fuselage Panel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [14] DONNADIEU P, SHAO Y, GEUSER F D, *et al.* Acta Materialia [J], 2011, 59(2): 462-472.
- [15] YU T F, LI B C, MEDJAHED A, *et al.* Materials Characterization [J], 2019, 147: 146-154.
- [16] HUANG B P, ZHENG Z Q. Scripta Materialia [J], 1998, 38(3): 357-362.
- [17] GUMBMAN E, GEUSER F D, SIGLI C, *et al.* Acta Materialia [J], 2017, 133: 172-185.
- [18] JIN X, FU B Q, ZHANG C L, *et al.* International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials[J], 2015, 22(12): 1313-1321.
- [19] 李红英. 航空航天通用型铝锂合金的成分设计和组织结构与性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- LI H Y. Composition Design, Microstructure and Properties of General Aluminum Lithium Alloy for Aerospace Application [D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [20] WANG X M, LI G A, JIANG J T, *et al.* Materials Science and Engineering: A[J], 2019, 742: 138-149.
- [21] ZHANG J, WANG C, ZHANG Y, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2018, 764: 452-459.
- [22] LIU T, WANG Q, ZHANG H F, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2009, 469(1): 258-263.
- [23] 贾丽. 2A97 铝锂合金的超塑性变形机理及表征方法研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- JIA L. Study on Superplastic Deformation Mechanism and Characterization Method of 2A97 Al-Li Alloy [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
- [24] KUMAR P, XU C, LANGDON T G. Materials Science & Engineering: A[J], 2005, 410: 447-450.
- [25] RIOJA R J, LIU J. Metallurgical & Materials Transactions A [J], 2012, 43(9): 3325-3337.
- [26] 杜康, 王军强, 曹海龙, 等. 铝加工[J], 2022(2): 3-9.
- DU K, WANG J Q, CAO H L, *et al.* Aluminium Fabrication [J], 2022(2): 3-9.
- [27] 刘红兵, 陈洁, 占小红, 等. 焊接[J], 2012(4): 14-18.
- LIU H B, CHEN J, ZHAN X H, *et al.* Welding & Joining [J], 2012(4): 14-18.
- [28] 李昊, 陈洁, 陈磊, 等. 航空制造技术[J], 2012(21): 50-53.
- LI H, CHEN J, CHEN L, *et al.* Aeronautical Manufacturing Technology [J], 2012(21): 50-53.
- [29] KNÜWER M, SCHUMACHER J, RIBES H, *et al.* 2198 Advanced Aluminium-Lithium Alloy for A350 Skin Sheet Application[C]// Proceedings of 17th AeroMat Conference and Exposition. Seattle, USA: 2006: 1-27.
- [30] 张琪. 有色金属加工[J], 2022, 51(1): 1-5.
- ZHANG Q. Nonferrous Metals Processing [J], 2022, 51(1): 1-5.