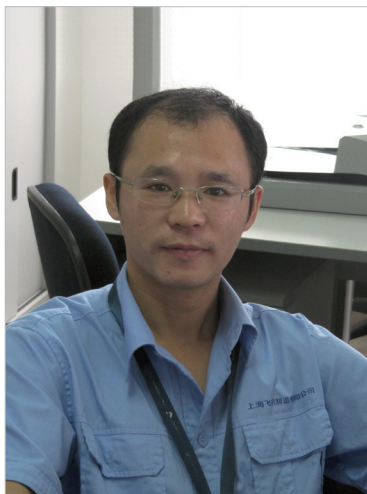


铝锂合金先进制造技术及其发展趋势*

Development Trend of Advanced Manufacturing Technology for Aluminum-Lithium Alloy

中国商飞上海飞机制造有限公司 孙中刚 郭旋 刘红兵 鲍鹏里 陈洁 周文龙



孙中刚

工程师, 博士后, 主要研究方向为钢铁材料热处理及塑性加工工艺、钛合金热处理及塑性加工工艺、铝合金钣金成形及热处理、高性能铜合金熔炼及热处理等。在研课题包括大型客机新型合金材料精密钣金成形及热处理技术研究等。

铝锂合金材料是近年来航空航天材料中发展最为迅速的一种先进轻量化结构材料, 具有密度低、弹

作为航空航天重要的结构材料, 铝锂合金受到西方国家的广泛重视, 如今第三代铝锂合金已在大型商用客机制造中获得应用并成为未来机型发展的重要趋势。但目前, 新型铝锂合金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、高损伤容限铝锂合金是我国铝锂合金未来发展的重要方向。

性模量高、比强度和比刚度高、疲劳性能好、耐腐蚀及焊接性能好等诸多优异的综合性能。用其代替常规的高强度铝合金可使结构质量减轻 10%~20%, 刚度提高 15%~20%, 因此, 在航空航天领域显示出了广阔的应用前景^[1-4]。然而, 由于其成本比普通铝合金高、室温塑性差、屈强比高、各向异性明显、冷加工容易开裂等, 导致其成形难度大, 目前只能成形较简单的零件, 难以制造复杂的零部件, 从而限制了其在结构部件方面的应用^[5-11]。近年来, 国外铝锂合金的研制和成形技术日渐成熟, 不仅在军用飞机和航天器上大量应用; 而且民用飞机铝锂合金的用量也呈增加态势, 如“奋进号”航天飞机的外贮箱、空客 A330/340/380 等系列飞

机。在我国, 由于铝锂合金熔铸工艺, 板料轧制挤压技术不成熟, 新型铝锂合金的开发研制相对落后, 目前只在某些型号的航天器中有少量应用。本文系统总结了铝锂合金近年来的发展状况以及国内外先进成形技术在铝锂合金中的应用现状及其发展趋势, 分析了铝锂合金研制和成形技术在我国的应用现状及与国际先进水平的差距, 并指出铝锂合金在我国航空航天领域的应用前景。

先进铝锂合金发展现状

按照铝锂合金研制的历史进程和成分特点, 可以将其划分成 3 个阶段, 如表 1 所示^[7]。

第一阶段为初步发展阶段, 该阶段的时间跨度大约为 20 世纪 50

* 中国博士后科学基金项目(20100481219)、辽宁省自然科学基金项目(20102024)资助。

年代至 60 年代初。其主要代表为 1957 年美国 Alcoa 公司研究成功的 2020 合金,并将其应用于海军 RA-5C 军用预警飞机的机翼蒙皮和尾翼水平安定面上,获得了 6% 的减重效果^[5-7]。前苏联在 60 年代成功研制了 BA д 23 合金。但这两款合金延展性低,缺口敏感性高、加工生产困难等,无法满足航空生产及性能要求,未取得进一步的应用。

20 世纪 60 年代中期,迫于能源危机的压力,铝锂合金被重新重视,并进入了快速发展阶段,即第二阶段。在这一时期,铝锂合金得到了迅猛发展和全面研究,其中具有代表性的合金有:前苏联研制的 1420 合金,美国 Alcoa 公司的 2090 合金,英国 Alcan 公司的 8090 和 8091 合金等^[6-11]。这些合金具有密度低、弹性模量高等优点,可用其替代航空航天器部分 2xxx 和 7xxx 铝合金。如前苏联在米格-29、苏-35 等战斗机及一些远程导弹弹头壳体上采用了 1420 合金构件。第二代铝锂合金虽取得了令人瞩目的研究和应用成果,但是由于存在严重的各向异性,且塑韧性低、热暴露严重、韧性损失,大部分合金不可焊等,使其难以与 7xxx 铝合金竞争。

20 世纪 80 年代末期,以美国的 Weldalite 049 系列合金为典型代表的第三代高强可焊铝锂合金相继被

研发出来,并已成功应用于航空航天等领域中^[5-11]。目前,新型第三代铝锂合金向着超强、超韧、超低密度等方向发展,其中高强可焊合金和低各向异性合金的研究最多。此外,还研制出了具有各向同性、以颗粒或晶须 SiC 陶瓷为增强体的铝锂金属基复合材料,其弹性模量达 130GPa,成为在航空航天领域中其他复合材料强有力的竞争者。

我国铝锂合金的研究起步虽然较晚,但经过中南大学、北京航空材料研究院和西南铝业公司等卓有成效的工作,国产化 1420、8090 等铝锂合金已应用于航空航天领域。新型第三代铝锂合金的研究逐渐成熟,并成功试制出了 2195 合金的大规格薄壁挤压管材和板材^[1-4]。随着国家对铝锂合金的重视,铝锂合金的研究工作逐年拓宽,并生产出了小规格板材和型材的半连续铸造工艺研究^[7]。目前我国已经具备了铝锂合金的大规模研制与开发能力,这对我国航空航天工业先进结构材料的需求具有重要的意义。

铝锂合金在航空航天中的应用及其发展趋势

据统计,每减轻 1kg 结构重量可以获得 10 倍以上经济效益,所以密度较低的铝锂合金受到航天工业的

广泛重视。铝锂合金已在许多航天构件上取代了常规高强铝合金。其中,美国的应用发展非常快,在航天工业上的应用尤为突出。洛克希德·马丁公司利用 8090 铝锂合金制造了“大力神”运载火箭的有效载荷舱,减重 182kg。1994 年,为解决“奋进号”航天飞机外贮箱的超重问题,洛克希德·马丁公司联合雷诺兹金属公司研发出新型 2195 材料以取代之前的 2219 合金。该合金的密度比 2219 合金的轻 5%,而其强度则比后者高 30%。采用 2195 制造的整体焊接结构贮箱,减轻重量 3405kg,其中液氢箱减重 1907kg,液氧箱减重 736kg,直接经济效益近 7500 万美元,因此被称为超轻燃料贮箱(Super Light Weight Tank)^[6-12]。俄罗斯在铝锂合金的研究、生产和应用方面也一直处于领先地位,为提高载荷能力,航天飞机的外燃料贮箱便采用铝锂合金制成,“能源号”运载火箭的低温贮箱是采用 1460 铝锂合金制成。

在航空领域,许多先进的战斗机和民用飞机都选用了铝锂合金。1988 年,洛克希德·马丁战斗机系统公司、航空器系统公司与雷诺兹金属公司共同制定了开发 2197 合金应用的计划——用其厚板制造战斗机舱壁甲板。1996 年,美国空军 F-16 型飞机开始用此合金厚板制造后舱甲板及其他零部件。除美国外,其他国家,如俄国、英国、法国等都在积极推进铝锂合金在航空航天器上的应用:威斯特兰(Westland)EH101 型直升机 25% 的结构件是用 8090 合金制造的,其总质量下降约 15%;法国的第三代拉费尔(Rafale)战斗机计划用铝锂合金制造其结构框架;俄罗斯在雅克-36、苏-27、苏-36、米格-29、米格-33 等战斗机都有大量零部件是用铝锂合金制造的^[1-11]。在民用飞机方面,空中客车工业公司的 A330、A340 和 A380 客机上都使用了铝锂合金,其中, A330 和 A340

表 1 Al-Li 合金分类及其发展

发展阶段	合金牌号	研制年代	研制国家	分类
初期	Scleron	1924	德国	Al-Cu-Li-Mn
第一代合金	2020	1957	美国	
	BA д 23	1961	前苏联	
第二代合金	1420	1965	前苏联	中强型
	2090	1984	美国	高强型
	2091	1984	法国	Al-Li-Cu-Mg
	8090、8091	1984	英国	Al-Li-Cu-Mg
第三代合金	1441、1450、1460	1989	前苏联	高强型
	Weldalite 049 系列	1989	美国	高可焊性
	2097、2197	1989	美国	高韧性
	2198、2196	90 年代	加拿大	高强可焊

每架飞机约有 3t 的铝锂合金用于机身结构、桁条等部件,目前最新型的 A350 客机在原有基础上,首次在机身蒙皮上使用全新的 2198 铝锂合金。美国的波音 747、777 客机、麦道系列飞机等均使用了铝锂合金,其使用部位包括燃料箱、隔框、机翼蒙皮、前缘、后缘等。庞巴迪 C 系列飞机机身也将全部采用全新的铝锂合金。

铝锂合金的先进制造技术及其发展趋势

1 超塑成形及超塑成形 / 扩散连接技术

超塑成形及超塑成形 / 扩散连接技术 (SPF 及 SPF/DB) 是利用材料的超塑性,对形状复杂、难以加工的薄壁零件,采用吹塑、胀形等方法进行成形的过程,是一种几乎无余量、低成本、高效的特种成形方法。铝锂合金与其他超塑材料一样可以通过合金化或者机械热处理获得均匀、细小、等轴晶而产生超塑性能。铝锂合金的 SPF 研究始于 1980 年,在 1982 年的范堡罗国际航空展览会上英国超塑性成形金属公司首次演示了铝锂合金的超塑性现象及其超塑 F 零件。美国 Weldalite 049 合金具有优异的超塑性,在 507℃ 固溶处理,不加反压, 4×10^{-3} 应变速率下,延伸率可达 829%^[7-11]。这一应变速率明显高于其他铝合金的应变速率,这对解决超塑工艺速度低的问题有重要意义。俄罗斯已经对 1420 采用 SPF 工艺加工了许多飞机的零部件,有的尺寸达 1200mm×600mm。国内航天材料及工艺研究所、北京航空制造工程研究所等科研单位针对铝锂合金的 SPF 及 SPF/DB 组合工艺进行了大量的开拓性工作,取得了很多成果。目前,铝锂合金的超塑成形正由次承力构件向主承力构件发展,并且由单一的超塑成形向超塑成形 / 扩散连接的组合工艺发展,使铝锂合金加工成本更低,结构更具整体性、轻质量。

2 旋压技术 (Spin Forming)

旋压技术是一项综合了锻造、挤压、拉伸、弯曲等工艺特点的少无切削加工的先进工艺。剪切旋压^[10]是近年来在传统旋压技术基础上发展起来的新型旋压技术,它不改变毛坯的外径而改变其厚度来实现制造圆锥等各种轴对称薄壁件的旋压方式(锥形变薄旋压)。这种成形方法的特点是旋轮受力较小,半锥角和壁厚互相影响,材料流动流畅,表面粗糙度好和成形精度高,并且能较容易地成形、拉伸、旋压难于成形的材料。航天器上许多 Al-Li 合金构件都是空心回转体薄壳结构,特别适用旋压法加工,其中最典型的零件是运载火箭低温贮箱的圆顶盖。美国“大力神”运载火箭圆顶盖采用 3 块直径为 0.65m,厚为 10.7mm 的 Weldalite 049 板材旋压制造。其中 1 块中部是使用变极性等离子弧焊 (VPPA) 焊接,经过 343℃/4h 去除应力,旋压时,所有毛坯用火焰加热保持 317℃;成形后进行 505℃/0.5h 固溶处理,水淬;再经 177℃/18h 人工时效,测得其室温拉伸强度达 600MPa 左右, -196℃ 时增加到 700MPa,且有很好的断裂韧性^[13]。“奋进号”航天飞机的外贮箱圆顶盖也采用了相同的旋压技术^[10],并在外贮箱的筒段采用了先进的剪切旋压技术,如图 1 所示^[14]。

3 辊锻成形技术 (Roll Forging)

Al-Li 合金特别是 Weldalite 系列合金和 1420 合金具有良好的锻造性能,用它们制造的模锻件不会出现开裂,这已被 150 多种锻件所证实。因而将其应用于航空航天工业

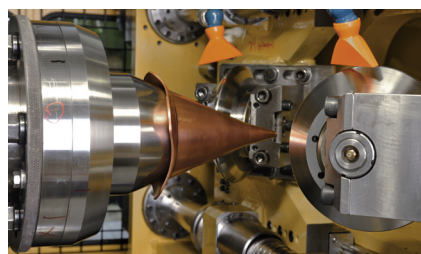


图1 剪切旋压

具有广阔的前景。辊锻是近年来发展起来的新型近净成形技术,将材料在一对反向旋转模具的作用下产生塑性变形得到所需锻件或锻坯的塑性成形工艺。辊锻成形的发展有两个重要领域。其一,是在长轴类锻件生产上实现体积分配与预成形,减少最终成形负荷,组成精锻复合生产线,用较少投资大批量生产复杂锻件。其二,是精密辊锻技术,包括冷精锻技术。在板片类零件的精密成形上有良好的发展前景,如在叶片成形与变截面钢板弹簧上均有优势。近年来辊锻成形的两个方向被成功应用于铝锂合金的环形锻件和带筋条的钣金件。如“奋进号”航天飞船外贮箱的“Y”形框和对接环^[10],如图 2 所示^[14]。



图2 铝锂合金辊锻成形“Y”形连接框

4 焊接技术 (Welding)

焊接是制造铝锂合金航空航天产品如贮箱、弹头外壳等的主要工艺之一。前苏联研究 1420 合金的焊接时间长达 10 多年,从焊接工艺方法、焊接组织、焊接性能及焊后热处理都进行了深入的理论研究和探讨^[8-15]。20 世纪 80 年代还开展了 1460 高强合金可焊性的研究。采用钨极氢弧焊 (GTAW) 和真空电子束焊 (EB) 工艺的 1460 合金,已成功用于制造“能源号”运载火箭贮箱^[8-15]。美、欧等国的铝锂合金焊接始于 20 世纪 80 年代初,与俄国不同的是,美国特别注重焊接裂纹的研究。美国采用的焊接方法主要有 GTAW、EB、VPPA (变极性等离子弧焊) 等,并

用 VPPA 法焊接了 Weldalite 049 合金制造的航天飞机外贮箱, Alcoa 公司采用 EB 焊对 12.7mm 厚的 2090 合金板材施焊, 焊透率达 100%。近几年 2 种新型焊接技术: 搅拌摩擦焊和激光焊接技术也开始应用于铝锂合金制造研究(图 3)^[15]。美国洛克希德·马丁公司用搅拌摩擦焊对 2.3~8.5m 厚的 2195Al-Li 合金及 2219 合金板材进行焊接, 发现接头强度可提高 15%~26%, 焊缝断裂韧性增高 30%, 塑性提高 1 倍, 焊缝组织极细小。空客公司经过 20 多年的努力利用激光焊接技术制造了大型客机用双光束“T”结构件, 并成功应用于 A330、A340、A380 等客机机身壁板上。

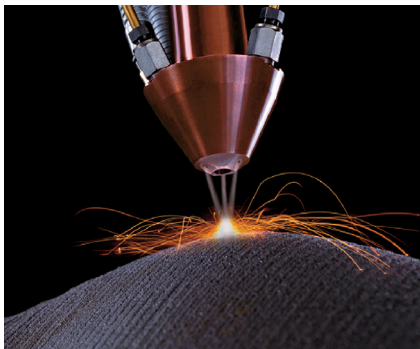


图3 铝锂合金激光焊接技术

5 新型热处理工艺技术(Heat Treatment)

铝锂合金的主要优点是密度低、比模量高、耐腐蚀强等, 综合性能较常规高强度铝合金优异。但在以压应力为主的变振幅疲劳试验中, 铝锂合金的这一优点不复存在, 主要原因在于, 其峰值强度材料短-横向的塑性与断裂韧性低, 各向异性严重, 人工时效前需施加一定的冷加工量才能达到峰值性能, 疲劳裂纹呈精细的显微水平时, 扩展速度显著加快。为改善铝锂合金的疲劳、断裂韧性等性能, 美国航天宇航局就新型的 2195 铝锂合金作了大量的研究工作, 开发了双级、三级、五级热处理工艺, 使得 2195 合金的室温断裂韧性和疲劳性

能提高了近 30%, 而强度与传统时效相当^[16]。目前我国研发新型铝合金的同时, 在生产工艺上也做了大量研究。通过新的热处理工艺(T74、T73)大幅度提高了 7xxx 合金断裂韧性和抗应力腐蚀开裂性能, 并进一步研究开发 7xxx 合金的热处理工艺, 如 7075-T76 用于 L-1011 机翼挤压壁板, 7075-T736 用于起落架构件、窗框和液压系统部件。但是目前针对铝锂合金的研究工作, 尚在起步阶段, 基础研究相对较弱, 离应用还有距离。铝锂合金的热处理应该在铝合金热处理的基础上, 结合国外的新工艺新方法, 开展系统的基础研究, 以求早日实现铝锂合金热处理工艺的工业化应用。

结束语

(1) 作为航空航天重要的结构材料, 铝锂合金受到西方国家的广泛重视, 如今第三代铝锂合金已在大型商用客机制造中获得应用并成为未来机型发展的重要趋势。但目前, 新型铝锂合金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、高损伤容限铝锂合金是我国铝锂合金未来发展的重要方向。此外, 铝锂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) 铝锂合金在铸造、轧制等技术逐渐成熟的基础上, 先进加工制造技术不断拓宽, 超塑成形、旋压、辊锻焊接等新工艺不断创新, 并已取得重大的应用成果, 然而, 由于其自身性能限制, 室温成形能力仍较困难。铝锂合金在大型客机中的应用主要以冷成形为主, 因此, 解决和实现复杂结构件的室温钣金成形和热处理工艺是未来我国大型客机用铝锂合金使用的关键技术和发展方向, 同时, 在传统工艺基础上不断开发新型技术,

提高成形精度、效率和质量。

参考文献

- [1] 张荣霞, 曾元松. 铝锂合金的发展、工艺特性及国外应用现状. 航空制造技术, 2007(增刊): 438-441.
- [2] 尹登峰, 郑子樵. 铝锂合金的研究开发的历史现状. 材料导报, 2003(2): 19-23.
- [3] 邱惠中. 铝锂合金的发展概况及其应用. 宇航材料工艺, 1993(4): 38-45.
- [4] 刘斌, 陈铮铮. 铝锂合金的发展与应用. 现代机械, 2001(4): 71-75.
- [5] 潘肃. 铝锂合金的发展及其工艺特性. 航天工艺, 1994(5): 40-45.
- [6] 霍红庆, 郝维新, 耿桂宏, 等. 航天轻型结构材料-铝锂合金的发展. 真空与低温, 2005(6): 63-69.
- [7] Lytle M T, Weft J A. The plastic anisotropy of an Al-Li-Cu-Zr alloy extrusion in unidirectional deformation. Metall Mater Trans A, 1996, 27(11): 3503-3511.
- [8] Li Hongying, Yi Tanga, Zeng Zaide, et al. Effect of aging time on strength and microstructures of an Al-Cu-Li-Zn-Mg-Mn-Zr alloy. Materials Science and Engineering A, 2008(498): 314-320.
- [9] Huang J C, Ardell A J. Addition rules and the contribution of δ' precipitates to strengthening of aged Al-Li-Cu alloys. Acta Metall, 1988, 36(11): 2995-3006.
- [10] Huang J C, Ardell A J. Precipitation strengthening of binary Al-Li alloys by δ' precipitates. Mater Sci Eng A, 1988, 104: 149-156.
- [11] 马高山. 复杂铝锂合金零件热成形技术. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [12] Gupta R K, Nayan N, Sharma S C. Development and characterization of Al-Li alloys. Materials Science and Engineering A, 2006, 420: 228-234.
- [13] 钟利萍. 1420 Al-Li 合金热处理工艺及组织性能的研究[D]. 长沙: 中南林学院, 2003.
- [14] John W, Marcia D, Eric H. Recent advances in near-net-shape fabrication of Al-Li alloy 2195 for launch vehicles, NASA Research Report, 2007.
- [15] Rainer K, Tamara V, Thomas S. Laserstrahlschweißen im flugzeugbau: stand und künftige anwendungen. Bremen: Laser-Anwenderforum, 2006: 13-14.
- [16] Chen P S, Bhat B N. Time-temperature-precipitation behavior in Al-Li Alloy 2195, NASA Research Report, 2002.

(责编 深蓝)