

文章编号:1674-8190(2013)02-158-06

先进铝锂合金的特点及其在民用飞机上的应用

孙洁琼, 张宝柱

(中航沈飞民用飞机有限责任公司 工程研发中心, 沈阳 110013)

摘要: 航空产品通常对其重量有严格要求, 当前最有效的减重方法是发展低密度材料。介绍低密度、高强度且具有良好损伤容限特性的铝锂合金材料; 通过其与常规铝合金、先进复合材料的性能对比和权衡研究, 重点分析第三代先进铝锂合金的性能特点及其在民用飞机上的应用; 给出铝锂合金国产化应用建议。研究结果可作为民用飞机设计选材和减重优化的参考和借鉴, 有助于铝锂合金材料的推广应用。

关键词: 民用飞机; 铝锂合金; 发展; 应用; 复合材料

中图分类号: V252

文献标识码: A

Al-Li Alloy Properties and Applications on the Commercial Aircraft

Sun Jieqiong, Zhang Baozhu

(Research & Development Center, AVIC SAC Commercial Aircraft Company, Ltd., Shenyang 110013, China)

Abstract: Weight is one of the most important performances for the aviation productions. The most effective approach to weight saving is developing the lower density material. The advanced Al-Li (Aluminum-Lithium) alloy with lower density, higher tensile strength, better damage tolerance etc is introduced. Compared with conventional aluminum alloys and advanced composites and through trade-off study, the properties of 3rd-generation Al-Li alloy and its applications on advanced aircraft are analyzed. The proposals of applications in civil aircraft program are presented. The research achievements can be the reference for materials selection and weight saving in commercial aircraft design, and benefit extending applications of Al-Li alloy.

Key words: commercial aircraft; aluminum-lithium alloy; development; application; composite

0 引言

随着航空航天产业的快速发展, 对飞行器重量、性能、能源消耗等要求地不断提高, 对材料也提出了更严格的要求。为降低重量、提高性能, 通常采用减小飞行器部件尺寸的办法, 但该方法会导致零件刚度降低和疲劳寿命减少。航空工程师们认识到, 发展高强度轻质合金是最有效的减重方法。铝锂合金是一种低密度、高强度且具有良好损伤容限性能的优质材料, 用它取代常规铝合金材料, 可

使构件密度降低 3%, 弹性模量提高约 6%, 质量减轻 10%~15%, 刚度提高 15%~20%^[1]。由于铝锂合金的上述优越性能, 现已在军用飞机、民用客机和直升飞机上使用或试用, 主要用于机身框架、襟翼翼肋、垂直安定面、整流罩、进气道唇口、舱门、油箱等。铝锂合金已逐渐成为现代飞机设计中最具竞争力的结构材料之一。

与世界先进水平相比, 国内对铝锂合金材料的研究及其在民用飞机上的应用还存在较大差距。为了介绍和推广铝锂合金材料, 并为我国民用飞机设计选材和减重优化等提供参考和借鉴, 本文对铝锂合金的性能特点、应用要求和前景等问题进行分析和研究, 提出国内民用飞机铝锂合金应用的建议, 对于现役机型的改进和优化, 包括减重、提高疲

寿命等以及进行自主知识产权的新机研制具有一定意义。

1 商用铝锂合金的历史

1.1 第一代商用铝锂合金

自 20 世纪 20 年代,许多国家开始了对铝锂合金的研究,但直到 20 世纪 50 年代,才由 Alcoa(美铝)公司研发出第一代商用铝锂合金 X2020,这种材料含 1.2% 的锂,与铝合金 2024 相比密度降低 3%,具有较高的压缩屈服强度,可用于机翼上壁板。X2020 曾用于美国海军 RA-5C 军用预警机的机翼蒙皮和尾翼水平安定面,取代铝合金 7075,获得了 6% 的减重效果,单架减重 73 kg^[1-4]。在超过二十年的服役中,未发现其构件的一般腐蚀、应力腐蚀和疲劳破坏等问题。但第一代铝锂合金还存在制造困难、断裂韧性差的缺点,在市场上没有获得更广泛地应用。

1.2 第二代商用铝锂合金

20 世纪 80 年代,前苏联成功研制出 1420 合金,该合金作为可焊接材料用于 Mig29 的机身和机头;Alcoa 公司研制出 2090 合金;Alcan 公司(当时属加拿大,现已被英国力拓公司收购)研制出 8090 和 8091 合金;法国 Pechiney 公司开发出 2091 合金。第二代铝锂合金在军用飞机上的应用包括俄罗斯的 Su227、Su235,美国的 C217,英国的 EFA2000 等;对于民用飞机,比较典型的是在 EH101 直升机以及空客 A330、A340 上的应用^[1-4]。

第二代铝锂合金增加了锂的含量,大约为 1.9%~2.7%,与铝合金 2024 相比,密度低 8%~10%,弹性模量增加 10%,强度与铝合金 7075-T6 相当^[1-4]。但锂含量的增加导致了材料较低的断裂韧性、耐腐蚀性差、热稳定性差、可成型性差,尤其是各向异性情况严重。由于第二代铝锂合金的缺陷比较明显,限制了其大范围使用。

1.3 第三代铝锂合金

20 世纪 80 年代以后,为了降低成本,克服第

一、二代铝锂合金的缺点,使其得到更大范围的应用,很多国家加强了铝锂合金的研究,第三代先进铝锂合金应运而生。

第三代铝锂合金降低了锂的含量(锂 < 1.8%),增加了 Cu 的含量,解决了各向异性的问题,同时还能够优化其机械性能^[1-4]。美国研制出了 Al-Cu-Li-Mg-Ag 合金,其中少量 Mg 能够帮助提高韧性,Ag 可提高抗应力腐蚀能力和可焊接性,Mn 和 Zr 可以控制纤维结构,降低 Fe、Si 的含量使纯度更高,更好地控制微观结构并获得良好的热机械性能。

20 世纪 90 年代以后,铝锂合金在飞机上得到了更大范围的应用,主要用来代替传统铝合金。例如在 F-16 战斗机中用作压力隔框材料,在商用飞机 A340、A350、A380 和 B777 上也都有所使用^[5]。

2 第三代铝锂合金特点

与传统铝合金相比,第三代铝锂合金优势明显。相较于铝合金 2024,其密度可降低 3.5%~5.0%;相较于铝合金 7075,其密度可降低 6.9%。同时,第三代铝锂合金的机械性能大幅提高:提高 20% 的屈服强度、40% 的疲劳强度和 250% 的疲劳裂纹扩展能力,增加 10% 的弹性模量,耐腐蚀性能也比目前正在使用的大部分铝合金(2000 或 7000 系列)要好^[5-6]。部分第三代铝锂合金的机械和物理性能如表 1 所示。

此外,铝锂合金还具有优越的加工工艺性:①可高速加工,变形量小;②可以进行化铣、成型、拉伸、热处理和钻孔;③显示出优异的连接性能和表面处理特性,能与当前表面处理和抗腐蚀应用兼容。

Alcoa 公司对第三代铝锂合金的研究表明,由于其抗疲劳性能优越,可以在减重 20% 的情况下,提高疲劳检查间隔时间两倍以上。以第三代铝锂合金 Al-Li 2099-T86 为例,其应力腐蚀门槛值为 50 ksi,而铝合金 7150-T7751 的应力腐蚀门槛值则为 25 ksi;其耐应力腐蚀能力则达到铝合金 2024 的五倍,如图 1 所示。长期暴露在海洋环境中的第三代铝锂合金,几乎不发生腐蚀现象,如图 2 所示。

表1 部分第三代铝锂合金的机械性能和物理性能

Table 1 Part of the third-generation Al-Li alloy mechanical properties and physical properties

材料牌号	材料规范	材料类型	厚度/in ^①	基值	$E/(10^3 \text{ ksi})$	$\omega/(\text{lb} \cdot \text{in}^{-3})$ ^②
2090-T83	AMS 4251	薄板	0.126-0.249	S	11.5	0.094
2098-T8	AMS 4457	薄板	0.125-0.249	A	—	0.097 1
2198-T8	AMS 4412	薄板	0.125-0.249	A	10.9	0.097
2098-T82P	AMS 4327	厚板	0.250-0.300	A	10.9(L)	0.097 1
2099-T83	AMS 4287	型材	0.500-0.999	A	11.4	0.095
2196-T8511	AMS 4416	型材	0.125-0.249	A	11.1	0.095

F_{10}/ksi ^③			$F_{0.2}/\text{ksi}$			$F_{0.2}/\text{ksi}$		
L	LT	45°	L	LT	45°	L	LT	45°
75	73	65	70	66	57	63	71	60
65	74	74(基值 S)	71	69	62(基值 S)	70	71	—
71	68	58	64	62	54	56	56	—
72	73	69	68	67	61	67	69	65
79	73	63	71	65	54	69	69	58
76	—	—	71	—	—	68	—	—

注: 1 in=25.4 mm; 1 lb/in³=27.68 g/cm³; 1 ksi=0.145 MPa

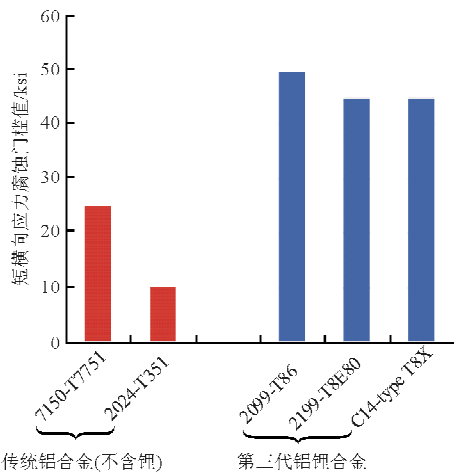
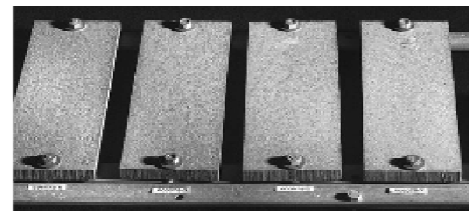


图1 传统铝合金与第三代铝锂合金应力腐蚀门槛值对比
Fig. 1 Comparison of stress corrosion threshold between traditional aluminum and the third-generation Al-Li alloy



(a) 7150-T8511 试件(连接并附有涂层)暴露
在海洋环境中一段时间,严重腐蚀



(b) Al-Li 2099 试件(无涂层)长时间暴露
在海洋环境中,无腐蚀

图2 传统铝合金与第三代铝锂合金的剥落
腐蚀情况对比(在海洋环境中)

Fig. 2 Comparison of exfoliation corrosion between traditional aluminum and the third-generation Al-Li alloy(in the ocean)

3 铝锂合金在民用航空领域的应用

3.1 铝锂合金在国外项目上的应用

空客公司在铝锂合金的应用上是先驱者,第一、二代铝锂合金都在该公司制造的飞机上有所应用。A380 飞机以铝合金为主要材料,用量占机身结构的 61%。该机地板横梁上采用了 2196 和 2099 铝锂合金,这两种合金中锂含量低于 2%,密度降低 4%~6%。铝锂合金在 A380 上的应用如图 3 所示。

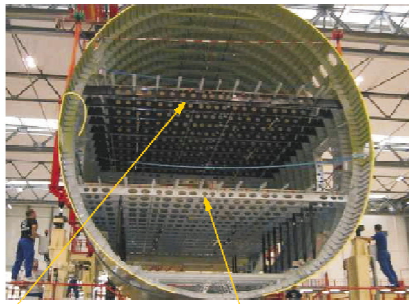


图 3 铝锂合金在 A380 上的应用
Fig. 3 Application of Al-Li alloy on A380

A350XWB 为降低运营成本,减小对环境的影响,在干燥区域的地板横梁、座椅滑轨和货舱地板结构中采用铝锂合金,大约减重 5%。通过降低重量,可以减少燃油消耗、降低成本并减小对环境的影响。同时,在金属地板梁结构中采用铝锂合金,也有利于形成导电通路。

A350XWB 机翼的翼肋也采用了铝锂合金。空客在选择该翼肋的用料时,主要以重量与成本的比值作为筛选依据,认为对于承力大的翼肋,铝锂合金优于复合材料;即使对承力小的翼肋,用复合材料也无多大优势。目前,Alcan 公司已对第三代铝锂合金 2050-T84 进行了翼肋的试验验证。该合金锂含量低,具有改进的淬透性,可制造较厚的板材,强度及韧性均超过了铝合金 7050-T7451,并减重 5%,该合金还有良好的搅动摩擦焊接性能,空客公司已成功进行了翼肋腹板与缘条的焊接。铝锂合金在 A350XWB 外翼上的应用如图 4 所示。

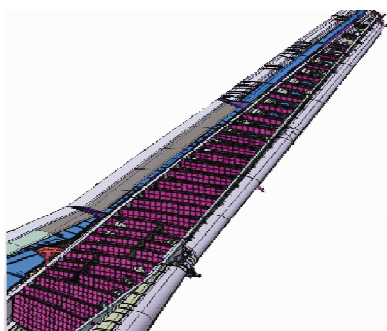


图 4 铝锂合金在 A350XWB 外翼上的应用(翼肋)
Fig. 4 Application of Al-Li alloy on A350XWB outer wing(rib)

空客公司反复对比铝锂合金与复合材料,最终选择前者为 A350XWB 的机头材料。因为若采用复合材料,还需要用钛合金来增强以抗鸟撞,而采

用铝锂合金,既经济又抗冲击^[7]。

庞巴迪公司的 C 系列是首先在机体结构上大量采用铝锂合金的窄体客机,铝锂合金的用量占全机结构的 23%,主要用于机身蒙皮,长桁,地板横、纵梁,支柱和地板滑轨结构。其中蒙皮采用 2198-T82,型材采用 2196-T82,可降低机身结构重量的 12%。C 系列机身结构材料选用情况如图 5 所示。

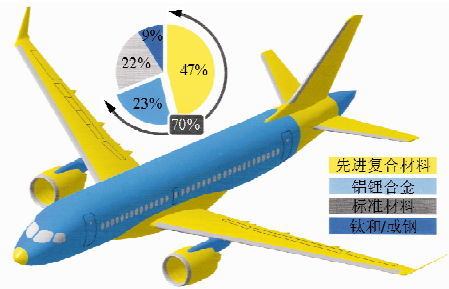


图 5 C 系列机身结构材料选用情况
Fig. 5 Material selection on C series fuselage structure

波音公司也对 777X 机身的潜在使用材料铝锂合金进行了研究,采用第三代铝锂合金不需要投资大体积热压罐等,可以避免类似 B787 飞机由于设备限制而在全球范围内选择供应商受限的情况。采用铝锂合金材料能够利用目前的低风险技术,使 777X 的燃油效率和减重效果最优化。

3.2 铝锂合金在国内项目上的应用

目前,铝锂合金仅在正在研制的国产某大型商用飞机上大量使用。2010 年 12 月,该型飞机机身等直段样件在中航工业洪都集团顺利下线,这是国内首次在机身上应用铝锂合金。该机主要应用第三代新型铝锂合金,包括机身蒙皮,长桁,地板纵、横梁,滑轨等结构。国产某大型商用飞机铝锂合金机身等直段样件如图 6 所示。



图 6 国产某大型商用飞机铝锂合金机身等直段
Fig. 6 Line part of domestic commercial aircraft's Al-Li alloy fuselage

4 铝锂合金与复合材料的比较

目前,民用飞机广泛使用复合材料,但随着铝锂合金的不断发展,二者在不同方面表现出各自的优势。复合材料耐腐蚀能力强,具有较高的拉伸强度和抗裂纹扩展能力,但也必须考虑其与金属件之

间的电偶腐蚀、防雷击等不足之处。因此,对于复合材料与铝锂合金的比较,不能直接得到结论,必须通过在航空运营中进行的权衡分析(Trade-Off Study)来全面评估^[8-9]。铝锂合金与复合材料的性能对比如表2所示。

表2 铝锂合金与复合材料性能对比

Table 2 Comparison of performance between Al-Li alloy and composite

对比条件	铝锂合金	复合材料	说明
重量	重	轻	传统观念
成本	低	高	包括设计、制造、维修成本
工艺	传统铝合金制造工艺	需要在热压罐内固化	全复合材料设计的 B787,由于需要大的热压罐设备,在全球范围内选择供应商受到限制
耐久性	特殊环境中,可能发生腐蚀	不易受腐蚀,但对潮湿敏感容易造成分层;与铝合金材料有电偶腐蚀现象	复合材料通常采用钛合金接头和紧固件,造成一定程度地成本增加
适用机型	适用于窄体飞机	更适用于宽体飞机	窄体飞机每天起飞着陆多,需承受多次飞行和着陆应力、增压载荷和飞机固有应力,要求机体足够强
损伤检查	检查方法与传统铝合金相同	内部比外部易损伤,需采用无损检测	—
损伤维修	通过打补丁,简单修理	维修复杂	—
环境影响	可完全回收,循环使用	回收困难,很难循环使用	对热固性复合材料而言
坠撞	坠撞时能够变形并吸收能量	有被压碎的倾向,伴有高强度碳纤维和树脂的分离	—
防雷击	无需特别设计	需进行特殊处理,如增加铜网进行屏蔽,造成增重	B787 仅此一项措施就使重量增加了 1 吨

传统观念认为复合材料比铝锂合金轻,但 Alcoa 认为,复合材料的优势在进行加强、防雷击(增加铜网)、使用钛合金紧固件等过程中丧失,全铝锂合金与全复合材料飞机相比,甚至能够减重 10% (最多);风险低,制造、运营和维修成本可降低 30%;同时可以提供同等的舒适性(例如较大的窗户,较高的湿度和增压)。如果这一结论被证实,铝锂合金的优势将进一步扩大。

5 应用建议

国内民用飞机铝锂合金的研究和应用与世界先进水平相比,还有一定差距。要实现铝锂合金材料的国产化,还需要进行不断地研究和试验。

由于目前国外大多数新型铝锂合金的技术资料仍属于保密级别,在国内铝锂合金的应用中,需

要进行足够的试验,如材料设计许用值、静强度特性(A 值和 B 值)、疲劳特性、损伤容限(da/dn 和 R 曲线)、连接试验等。同时,还需要评估供应商的制造能力并进行必要的工艺测试,如材料成型(拉伸、滚弯、液压成型等)、机加、下陷加工、化铣、表面处理等。另外,材料必须证明能够满足适航的相关要求才能应用,同时也需要对成本进行全面分析,以获得最佳设计。

6 结束语

当前国际上新研的空客 A380 和正在研制的空客 A350、庞巴迪 C 系列飞机以及国产某大型商用飞机等,在机体结构上都大量采用了第三代先进铝锂合金。这表明高性能的铝锂合金正逐渐成为当前及未来民用飞机材料选用的新趋势。从国内

外航空发展、客户使用和经济角度考虑,采用重量轻、强度高的铝锂合金代替传统的铝合金是飞机设计的必然趋势。

不论是对传统铝合金还是复合材料,铝锂合金都具有一定的优势,但对于具体应用,还需要根据实际研制情况进行权衡分析。由于技术原因,相比传统铝合金,铝锂合金的材料和工艺成本还相对较高,实际应用时需要对成本增加和其所带来的利益进行权衡研究。由于铝锂合金的显著优势,制造商对其改进和研发从来没有停止,伴随着新技术、新工艺的发展,铝锂合金材料必将有更广阔的应用前景。对于飞机制造商来讲,铝锂合金也必将成为更具竞争力的选择。

参考文献

- [1] 黄光杰,汪凌云. 铝锂合金的发展、应用和展望[J]. 材料导报, 1997, 11(2): 21-24.
Huang Guangjie, Wang Lingyun. Development, application and prospect of Al-Li alloys[J]. Materials Review, 1997, 11(2): 21-24. (in Chinese)
- [2] 杨守杰,路政,苏彬,等. 铝锂合金研究进展[J]. 材料工程, 2001(5): 40-47.
Yang Shoujie, Lu Zheng, Su Bin, et al. Development of aluminum-lithium alloys[J]. Journal of Material Engineering, 2001(5): 40-47. (in Chinese)
- [3] 黄兰萍,郑子樵,李世晨,等. 铝锂合金的研究与应用[J]. 材料导报, 2005, 16(5): 20-23.
Huang Lanping, Zheng Ziqiao, Li Shichen, et al. Research and applications of Al-Li alloy[J]. Materials Review, 2005, 16(5): 20-23. (in Chinese)
- [4] Tayon, Wesley. Exploration of incompatibility in Al-Li alloys using high energy diffraction microscopy and a crystal plasticity model[EB/OL]. (2012-05-22) [2013-01-07]. <http://hdl.handle.net/2142/31034>.
- [5] Starke Jr E A, Staley J T. Application of modern aluminum alloys to aircraft[J]. Progress in Aerospace Sciences, 1996, 32(2-3): 131-172.
- [6] Richard C Rice. MMPDS-05 metallic materials properties development and standardization[S]. USA: National Technical Information Service, 2003.
- [7] 陈亚莉. A350XWB的选材思路及特点[J]. 国际航空, 2009(3): 69-72.
Chen Yali. Innovation of structure materials on A350XWB [J]. International Aviation, 2009(3): 69-72. (in Chinese)
- [8] Ernest Arvai. Will aluminum-lithium beat composites for narrow body airlines[EB/OL]. (2010-10-18) [2013-01-07]. <http://airinsight.com>
- [9] Cindie Giummarra, Bruce Thomas, Roberto J Rioja. New aluminum lithium alloys for aerospace applications[C]. [S. l.]: Proceedings of the light metals technology conference, 2007.

作者简介:

孙洁琼(1980—),女,工程师。主要研究方向:飞机结构设计。

张宝柱(1972—),男,高级工程师。主要研究方向:飞机总体设计。

(编辑:马文静)