

文章编号:1674-8190(2019)01-012-09

铝锂合金材料发展及综合性能评述

李飘,姚卫星

(南京航空航天大学 航空宇航学院,南京 210016)

摘要: 在抗疲劳设计等工程应用中,对材料综合性能的准确把握是使用材料进行设计的基础。作为一种航空材料,铝锂合金因具有高比强度、高比刚度的性能而受到青睐,与普通铝合金相比,铝锂合金的各方面性能,包括常规力学性能和疲劳断裂性能,具有独特特征。不同时期研发的铝锂合金产品,其各方面性能也有显著差异。本文通过比较铝锂合金和普通铝合金的性能差异,以及比较不同铝锂合金之间的性能差异,对铝锂合金材料性能发展进行综合评述。通过对铝锂合金发展历程、常规力学性能、疲劳极限和疲劳抗力、疲劳裂纹扩展抗力的分析,给出了结构设计选材的一些建议。

关键词: 铝锂合金;性能评述;力学性能;疲劳抗力;疲劳裂纹扩展

中图分类号: V252.2

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.01.002

Review on the Development and Performance of Aluminum-lithium Alloys

Li Piao, Yao Weixing

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In the engineering application like anti-fatigue design, the accurate understanding of the material performance is the foundation for the application of material. As a kind of aeronautical material, aluminum-lithium alloys are favored for their high specific strength and high specific stiffness. Compared with conventional aluminum alloys, aluminum-lithium alloys exhibit unique characteristics towards various aspects of performance, fatigue and fracture properties included. Significant differences can also be found in the performance of aluminum-lithium alloys developed at different times. The aim of this paper is to review different properties of aluminum-lithium alloys by comparing the performance difference between aluminum-lithium alloys and conventional aluminum alloys, and comparing the performance difference among different aluminum-lithium alloys. Based on the analyses of development history, mechanical properties, fatigue limit and fatigue resistance, and fatigue crack growth resistance, some suggestions for material selection in structural design are given.

Key words: aluminum-lithium alloy; performance review; mechanical property; fatigue resistance; fatigue crack growth

0 引言

航空工业一直致力于寻找轻质且性能优越的结构材料。以 2024 和 7075 为代表的普通铝合金

在航空发展过程中起到了关键作用。2 系和 7 系铝合金具有较高的强度,但在质量上不具有优势,在航空发展中逐渐失去吸引力。从 20 世纪中叶开始,对于更轻质实用的铝合金的需求促进了铝锂合

收稿日期:2018-03-26; 修回日期:2018-05-28

通信作者:姚卫星,wxiao@nuaa.edu.cn

引用格式:李飘,姚卫星. 铝锂合金材料发展及综合性能评述[J]. 航空工程进展, 2019, 10(1): 12-20.

Li Piao, Yao Weixing. Review on the development and performance of aluminum-lithium alloys[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(1): 12-20. (in Chinese)

金的产生^[1-2]。作为质量最轻的金属元素,锂可以有效地降低合金密度。在所有降低飞机结构质量的方法中,降低材料密度比增加静强度高效 3~5 倍^[3]。每增加 1%质量的锂,可以带来 3%的密度降低,以及 6%的弹性模量的增加^[4-6]。近几十年来,复合材料也成为研究的热点,波音 787、空客 A380 大量使用复合材料可以很好地印证这一点^[7]。尽管复合材料在航空工业中展示出优秀的开发潜能,但相对较低的冲击损伤阻力以及由环境变化(湿度,冷/热环境)带来的复杂力学性能变化,在某种程度上降低了复合材料的竞争力^[7]。就工艺成熟度、力学性能稳定性、以及经济性来说,铝锂合金具有显著的优势。

铝锂合金广泛的应用需要促进了对其各方面性能的深入研究。高比强度和比模量是铝锂合金常规力学性能中的显著特性。但是不同时期的铝锂合金其静力性能表现经过发展衍变又有不同。其他性能,例如疲劳性能,由于试验数据很难在公开文献中找到,缺乏对铝锂合金疲劳性能的定量化认知。对于工程应用而言,进行全面的铝锂合金性能评述具有实际意义。国内外,已经在该领域开展了相关工作。V. V. Antipo 等^[8]分析了高强普通 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金与铝锂合金的静力性能、沉淀相影响以及腐蚀抗力等。孙东立等^[9]对铝锂合金的物理冶金、力学性能以及强化机制进行了评述;吴秀亮等^[10]对国内外铝锂合金的研究历史和发展现状进行了回顾,并对锂铝合金在航空航天领域中的应用情况进行了总结。

上述研究主要针对铝锂合金的性能进行了定性化的探究,而本文选择不同代的典型铝锂合金,

主要开展定量化的性能对比分析,包括铝锂合金的常规力学性能、疲劳极限和疲劳抗力、疲劳裂纹扩展抗力等,以期对相关结构设计提供一些参考。

1 铝锂合金的发展

自 1924 年德国研发出第一种铝锂合金产品 Scleron 之后,铝锂合金的发展持续了近一个世纪。很多不同的铝锂合金产品在那个时期被研发出来,它们的性能也得到了深入细致地研究。铝锂合金的发展经历了三个标志性的阶段,由此铝锂合金产品可以划分为三代,如表 1 所示。第一代铝锂合金的显著特点是密度低,其他方面的研究刚进入起步阶段,性能欠佳。第二代铝锂合金的主要特点在于密度进一步降低,但是各向异性问题突出,不可焊,强度韧性不平衡。第三代铝锂合金最显著的特点是低各向异性,可焊,同时各方面性能相对更均衡。三代铝锂合金的合金元素种类及含量显著不同,主要合金元素锂的含量经历了先增加后减少的过程,锂的含量在一定程度上影响着微观沉淀相的比例,进而影响合金宏观性质。第三代铝锂合金的微合金化增加了有效弥散相粒子,增强了弥散强化,某些特殊弥散相具有特殊作用,例如加入铍元素可以抑制钠的晶界偏析,提高合金韧性。三代铝锂合金加工工艺和热处理方式也得到了不断改善。第三代铝锂合金通过合理运用再结晶程序以及预变性处理,有效改善了第二代铝锂合金的各向异性问题。综合以上因素,铝锂合金的基本力学性能、热稳定性以及抗疲劳抗力得到了逐代提升。

表 1 铝锂合金分类及基本情况

Table 1 Classification and basic situation of Al-Li alloys

分 类	发展时间	Li 含量(wt%)/%	密度/(g·cm ⁻³)	代表合金	文 献
第一代	1950~1960 年	<1.5	2.60~2.70	2020/BAII23	[11]
第二代	1960~1980 年	>2.0	2.50~2.60	2090/2091/8090/8091	[12-13]
第三代	1980 年以后	<2.0	2.60~2.80	2097/2197/2198/2050	[11-12,14]

第一代铝锂合金的研发时间可追溯到 20 世纪 50~60 年代。作为第一种被研发的铝锂合金,Scleron 的研发并未引起重视,铝锂合金真正引起关注是从 2020 进入工业化生产以后。

第二代铝锂合金的发展可以追溯到 20 世纪 60~80 年代。第二代铝锂合金中,锂的质量分数在 2.0%以上,相比于第一代铝锂合金,铜的含量相对较少。由于锂的含量高,第二代铝锂合金可以

达到 7%~10% 的质量减小,以及 10%~16% 的弹性模量增长^[11]。但是与此同时,第二代铝锂合金仍然存在较严重的问题,例如可焊性不好,存在各向异性以及强度不高等。

第三代铝锂合金始于 20 世纪 80 年代晚期,针对第二代铝锂合金出现的各种问题,第三代铝锂合金进行突破与改善。通过降低锂含量、添加微量元素和调节主要合金元素比例^[15-16]、预变形处理^[17-18]、改善热处理工艺^[19]、进行分级时效^[20]等措施,使得第三代铝锂合金内部组织更均匀,各项异性问题得到了显著改善,强度和韧性实现了更好的平衡。第三代铝锂合金成熟的代表有 2097、2197、2297、2198、Weldalite049。

2 力学性能

以三种不同代的典型铝锂合金(2020, 8090, 2198)为代表,与普通铝合金 2024 和 7075 进行比较。

典型铝锂合金和普通铝合金的主要力学性能如表 2 所示。相对于普通铝合金,铝锂合金的平均弹性模量更高^[21-23],增量约 5.5%。铝锂合金的高弹性模量主要得益于其连续有序相 δ' 的影响^[24]。 δ' 相由于其有序性具有高本征弹性模量(约 96 GPa),同时其易于剪切的性质增强了铝锂合金的固有延展性。铝锂合金的时效程度对弹性模量也有一定影响^[25],弹性模量值随时效时间的增加而减小,这与沉淀相的体积分数随时效时间增加而增加有直接关系。从第一代铝锂合金到第三代铝锂

合金,其弹性模量值呈现先增加后减少的趋势,该趋势与三代铝锂合金的锂含量先增后减直接相关。高弹性模量值是结构设计中的一个有利指标,但是对于铝锂合金,片面追求高弹性模量,会加剧由 δ' 相带来的诸如强织构、低塑韧性等问题。综合权衡之下,通过舍弃部分弹性模量值来实现合金更均衡的内部结构具有现实意义。

代表铝锂合金中,第三代铝锂合金 2198 的屈服强度最低,其值仍超过普通铝合金 2024 屈服强度的 18.4%。铝锂合金 2020 在三种铝锂合金中强度最高,它的屈服强度相对于普通铝合金 7075 只高出了 2.9%,表明铝锂合金 2020 和普通超强铝合金 7075 的强度水平处于同一层次。所有代表铝锂合金的抗拉强度都高于高强铝合金 2024,低于超高强度铝合金 7075,表明铝锂合金的强度在铝合金产品中处于中等水平。三代铝锂合金的抗拉强度逐代降低。第一代和第二代铝锂合金的研制侧重于降低合金密度,对合金内部结构的均衡性考虑较少,且所使用的多是未再结晶的合金,合金内部呈现粗糙的晶体学织构组织,这些未再结晶织构有助于提升合金强度,但同时也导致合金强度具有显著各向异性。因此,第一代和第二代铝锂合金短横向的强度相对纵向强度有较大的降低。第三代铝锂合金为了降低合金各向异性,得到更均匀的内部组织,降低了锂元素含量,使用了再结晶技术。用强度的损失换来了其他方面性能,例如韧性、疲劳抗力等的提高,同时解决了各向异性问题。

表 2 铝锂合金和普通铝合金的基本力学性能

Table 2 Mechanical properties of Al-Li alloys and conventional alloys

合金牌号	E/GPa	σ_s/MPa	σ_b/MPa	$\epsilon_1/\%$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	文 献
2020	77.0	534	567.0	5.00	2.67	[26]
8090	79.0	450	495.0	6.00	2.54	[11,27]
2198	72.8	432	484.0	11.55	2.70	[11]
2024	73.6	365	464.0	17.60	2.78	[27]
7075	71.0	519	585.3	12.70	2.81	[28]

比强度和比模量是飞行器结构选材的两个重要指标。铝锂合金和普通铝合金的比强度和比模量如表 3 所示,可以看出:铝锂合金 2020 的静强度比超高强度铝合金 7075 低,其比强度值高于

7075,与普通高强铝合金 2024 相比,铝锂合金的比强度更高^[29-31]。铝锂合金的比模量也比普通铝合金高;另外,铝锂合金具有更高的屈强比。

表 3 力学性能定量分析

Table 3 Quantitative analysis of mechanical properties

合金 牌号	$(\sigma_b/\rho)/$ [MPa · (g · cm ⁻³) ⁻¹]	$(E/\rho)/$ [GPa · (g · cm ⁻³) ⁻¹]	σ_s/σ_b
2020	212	29	0.94
8090	195	31	0.91
2198	179	27	0.89
2024	167	26	0.79
7075	208	25	0.89

3 疲劳性能

3.1 高周疲劳

普遍认为,锂的加入提高了合金的高周疲劳(HCF)强度^[32]。Z. Di 等^[33]对比了纯铝和铝锂合金的高周疲劳强度,证明了锂的加入显著提高了疲劳寿命。但是目前还未见对锂含量和疲劳寿命之间定量关系的研究。一些其他对于高周疲劳抗力的研究^[34-38]从侧面探究了沉淀相影响、晶粒尺寸影响、时效程度影响、冶金方式影响,以及结晶程度影响。

由于疲劳强度是一系列因素综合作用的结果,锂含量的影响无法被准确区分出来,铝锂合金和普通铝合金之间疲劳强度的比较只能停留在数据统计的层面。从收集到的数据来看,铝锂合金的疲劳强度明显高于普通铝合金 2024 和 7075,铝锂合金的高疲劳抗力特性参见文献^[39]。当考虑密度时,铝锂合金的比疲劳强度进一步增大,如表 4 所示。

表 4 铝锂合金的疲劳极限和比疲劳强度

Table 4 Fatigue limit and specific fatigue strength of Al-Li alloys

合金牌号	σ_{-1}/MPa	$(\sigma_{-1}/\rho)/$ [MPa · (g · cm ⁻³) ⁻¹]	文献
2020	208	78	[41]
8090	170	67	[27]
2198	220	81	[34]
2024	148	53	[42]
7075	141	50	[28]

三代铝锂合金中,第二代铝锂合金 8090 的比疲劳强度最低,但也比普通铝合金 2024 高出 26%,比 7075 高出 34%。第三代铝锂合金 2198 的比疲劳强度最高,比 2024 高出 53%,比 7075 高

出 62%。铝锂合金的主要沉淀相 δ' 在合金中呈高度弥散状分布,其易于剪切的特性可能导致可逆滑移,减少了位错等缺陷的产生,缓解了外力作用下的内部局部应力应变集中。大量分布的弥散状沉淀相延缓并适当阻止了局部平面滑移^[32],位错、滑移等缺陷处是疲劳裂纹易于萌生和扩展的区域,因此铝锂合金得益于其内部结构,具有更长的疲劳裂纹萌生寿命,进而疲劳寿命更高。

就铝锂合金本身而言,第三代铝锂合金在第二代铝锂合金的基础上,疲劳抗力进一步提高,2198 的比疲劳强度比 8090 高出 21%。第三代铝锂合金相对于第二代铝锂合金一个显著的改变是降低了锂的含量(小于 2%),提高了铜的含量(一般大于 3%),一些新的合金化元素,例如 Ag、Mn、Zn 等也在第三代铝锂合金中得到应用。合金化元素的添加和元素含量的控制有效改善了铝锂合金的析出相,提高了晶界特性。热处理方式的优化也是第三代铝锂合金性能提升的一个重要促进因素。第二代铝锂合金以未再结晶扁平晶粒结构为主,具有显著的各向异性。第三代铝锂合金的热处理方式包括再结晶、形变热处理、多级时效等,通过这些方式获得了更均匀细化的晶粒组织,减少了塑性变形中的位错堆积和沿粗大晶界的裂纹形核,在大幅降低各向异性的同时,提高了合金的韧性和疲劳寿命。

疲劳强度和比疲劳强度是长寿命要求的结构选材的重要评估指标。飞机的结构质量在全机质量中的占比是一个会影响飞机整体性能的参数,通常在一定范围内,结构质量越低,飞机的整体性能越优。减少材料使用或者片面降低结构质量会使结构难以实现疲劳寿命指标。选择高比疲劳强度材料是解决这一难题的有效途径。第三代铝锂合金的比疲劳强度高,在长寿命要求的结构选材时具有明显优势。F-16 战机的后机身舱壁通过将原来使用的 AA2124 铝合金换成 2197 第三代铝锂合金,解决了疲劳寿命不足、服役时间达不到 8 000 h 的问题^[40]。铝锂合金也在民用飞机地板梁上大量采用。类似对质量和疲劳寿命要求高的飞机结构,例如机翼下翼结构可以采用铝锂合金。

3.2 低周疲劳

国内外亦对铝锂合金的低周疲劳(LCF)特性

进行了研究^[43-49]。通常用 Manson-Coffin 公式来评估低周疲劳抗力。

$$\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (1)$$

式中： $\frac{\Delta \epsilon_p}{2}$ 为塑性应变幅； N_f 为载荷循环数； ϵ'_f 和 c 分别为疲劳延性系数和疲劳延性指数。

大部分铝锂合金的幂律关系具有双线性^[44-45]，如图 1 所示。图 1 中各材料的疲劳延性系数和疲劳延性指数如表 5 所示。

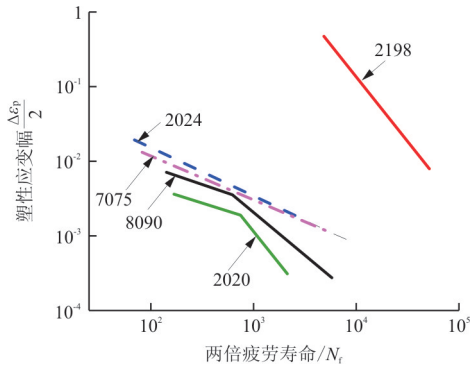


图 1 铝锂合金和普通铝合金的 Manson-Coffin 曲线

Fig. 1 Manson-Coffin curves of Al-Li alloys and conventional alloys

表 5 铝锂合金和普通铝合金的低周疲劳参数

Table 5 Low cycle fatigue parameters of Al-Li alloys and conventional alloys

合金牌号	超低周阶段		亚低周阶段		文献
	ϵ'_f	$-c$	ϵ'_f	$-c$	
2020	0.04	0.43	243.36	1.80	[47]
8090	0.06	0.46	5.50	1.15	[44]
2198	—	—	6.05	1.73	[50]
2024	0.28	0.64	0.28	0.64	[10]
7075	0.19	0.60	0.19	0.60	[10]

从图 1 可以看出：第一代和第二代铝锂合金的应变—寿命曲线都位于普通铝合金 2024 和 7075 之下，即第一代和第二代铝锂合金的低周疲劳抗力更低；第一代和第二代铝锂合金与普通铝合金低周疲劳强度最接近的点是它们塑性应变—寿命曲线的转折点，转折点以上的超低周阶段和转折点以下的亚低周阶段，铝锂合金的疲劳抗力（用塑性应变幅衡量）比普通铝合金约低一个数量级。第一代和第二代铝锂合金低周疲劳抗力低主要是由于连续可剪相 δ' 加大了合金内部滑移性，易造成高程度的

应变集中^[46,51-52]。第三代铝锂合金在第二代铝锂合金的基础上经过改良以后，低周疲劳抗力得到显著提高。在亚低周阶段，相同循环数的情况下，第三代铝锂合金 2198 的低周疲劳强度比普通铝合金 2024 和 7075 高了两个数量级。第三代铝锂合金的低周疲劳抗力提高，一方面是由于锂含量的降低，另一方面是由于热处理和加工工艺的改善减少了合金的织构组织，内部组织更均匀，应变集中得到缓解。

第一代和第二代铝锂合金的低周疲劳抗力低，不适用于高应力环境，第三代铝锂合金具有较高的低周疲劳抗力，同时结合优异的高周疲劳抗力，第三代铝锂合金对于各种疲劳应力环境都有更高的适用性。飞机结构上很多构件需要承受应力集中，例如因截面变化、拐角和孔造成的应力分配不均匀，这些构件长期承受高应力作用，对低周疲劳性能有较高要求。脆性破坏也是这些敏感部位需要避免的破坏形式，因此材料韧性也是一个重要的评估指标。第三代铝锂合金的韧性相比第二代铝锂合金得到了较大改善，结合优异的低周疲劳性能，第三代铝锂合金可作为应力集中敏感部件的一个较好选择。

4 疲劳裂纹扩展抗力

典型铝锂合金和普通铝合金的疲劳裂纹扩展数据，如图 2 所示。

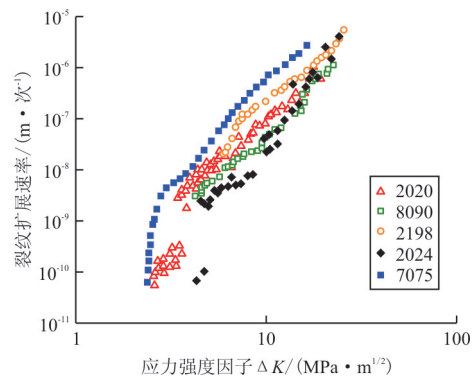


图 2 铝锂合金和普通铝合金的裂纹扩展

Fig. 2 Crack propagation of Al-Li alloys and conventional alloys

疲劳裂纹扩展速率可用 Paris 公式表示：

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (2)$$

式中： C 和 m 均为材料常数。

通过数据拟合,指数 m 的值如表 6 所示。和普通铝合金相比,铝锂合金的裂纹扩展速度更低,裂纹扩展抗力更高。铝锂合金的高裂纹扩展抗力主要来自于长裂纹的疲劳抗力,铝锂合金的短裂纹扩展抗力和普通铝合金相当,不具有优越性^[53-55]。铝锂合金的疲劳应力强度因子门槛值和普通铝合金不相上下。

表 6 铝锂合金和普通铝合金的裂纹扩展参数
Table 6 Crack propagation parameters of Al-Li alloys and conventional alloys

合金牌号	$K_{IC}/$ (MPa · m ^{1/2})	$\Delta K_{th}/$ (MPa · m ^{1/2})	m	文 献
2020	23.60	2.59	4.42	[56]
8090	27.00	4.24	3.51	[57-58]
2198	30.15	5.95	3.28	[59-60]
2024	29.00	4.31	5.02	[61]
7075	28.00	2.38	4.91	[56]

疲劳裂纹扩展特性可以用参数 K_{IC} 、 ΔK_{th} 和 Paris 公式中的指数 m 来评估。断裂韧性 K_{IC} 表示材料失稳扩展时所需的临界应力强度因子大小,也可以表征材料断裂前吸收的能量大小,因此 K_{IC} 的值越大,表示裂纹扩展至失稳状态的临界应力强度因子越大,材料能够吸收的能量越多,材料的韧性越好。第一代和第二代铝锂合金的 K_{IC} 值较低,韧性较差,早期铝锂合金的低韧性问题长久地影响着铝锂合金的工程应用。第三代铝锂合金的 K_{IC} 值较高,韧性明显优于前两代铝锂合金。第三代铝锂合金通过调节合金元素含量和改善热加工工艺,使韧性得到了一定提高,实现了强度和韧性更好的平衡。

裂纹扩展的应力强度因子门槛值 ΔK_{th} 是衡量材料耐久性的一个指标,在低于门槛值的应力强度因子作用下,裂纹扩展速度几乎为零,因此该门槛值越高,表示带裂纹的材料进入裂纹扩展所需要的驱动力越高,材料的耐久性越好。第一代和第二代铝锂合金的裂纹扩展门槛值与普通铝合金相近,第三代铝锂合金的门槛值明显高于前两代铝锂合金和普通铝合金,第三代铝锂合金的耐久性更好。

裂纹进入扩展以后的扩展速率可以用 Paris 公式中的指数 m 来衡量。在裂纹扩展的双对数坐标图中, m 的值是裂纹扩展曲线的斜率,直接反映

了裂纹扩展速率。 m 值越大,裂纹扩展越快,反之越慢。三种典型铝锂合金的 m 值都低于普通铝合金,铝锂合金具有明显的抵抗裂纹扩展的优势。第三代铝锂合金的 m 值最低,其裂纹扩展抗力最高。

铝锂合金优异的裂纹扩展抗力得益于裂尖屏蔽效应。铝锂合金沉淀相中的连续可剪相 δ' 易于引起不均匀的可逆滑移、高塑性应变集中,进而导致裂纹面粗糙、裂纹发展路径曲折^[62-63]。克服粗糙裂纹面的相互嵌入消耗了部分驱动力,曲折的裂纹路径使裂尖前进方向偏离外力垂直方向,减小了裂尖驱动力^[41,64-68]。裂尖屏蔽效果与铝锂合金的合金成分、热处理以及加工工艺有关。第二代铝锂合金的裂纹扩展抗力优于第一代,第三代铝锂合金的裂纹扩展抗力优于第二代。

综上所述,第三代铝锂合金韧性最高,裂纹扩展门槛值最高,裂纹扩展速率最低,裂纹扩展抗力最优,适用于损伤容限设计。近年来,铝合金焊接技术飞速发展^[69],对焊后的结构进行疲劳和损伤容限性能测定,检验证实焊接结构已具有常规的合金结构设计需要的性能^[70]。用焊接取代传统铆接可以在一定程度上减少结构质量,同时避免了裂纹在铆钉应力集中处的萌生。可焊性和损伤容限性能是焊接材料选择的重要指标。第三代铝锂合金大部分为高强可焊合金,其突出的裂纹扩展抗力保障了损伤容限性能。第三代铝锂合金在焊接结构等对损伤容限性能要求高的结构中具有很好的适用性。

5 结构设计选材建议

(1) 铝锂合金在减重方面具有显著优势,这一优势使其适用于长寿命要求的结构,例如民用飞机相关结构。

(2) 铝锂合金的静强度接近超高强铝合金,比高强铝合金高,比强度和屈强比更高,但同时第一代和第二代铝锂合金韧性低,适用于对强度,尤其是比强度有高要求的结构,不适用于对韧性要求高的结构。

(3) 铝锂合金具有杰出的高周疲劳抗力,低周疲劳抗力较低,适用于低应力服役环境。

(4) 得益于裂尖屏蔽效应,铝锂合金具有优异的裂纹扩展抗力,尤其第三代铝锂合金抵抗裂纹扩展能力突出,该特性使得铝锂合金适用于耐久性结

构设计。

6 结束语

铝锂合金的静力性能特征为:具有高比强度和屈强比,第一代和第二代铝锂合金的韧性低,第三代铝锂合金的韧性水平相对较高。铝锂合金的疲劳性能特征为:三代铝锂合金都具有杰出的高周疲劳抗力和疲劳裂纹扩展抗力,其低周疲劳抗力相对较低,总体上,第三代铝锂合金的疲劳性能最优。

铝锂合金是经过长久检验与应用的航空材料,其工艺成熟度、材料性能稳定性以及经济性决定了在没有更稳定成熟的材料出现之前,它将继续作为一种主要航空材料被广泛使用。充分了解和利用铝锂合金的综合性能特征,能够最大程度地发挥其在航空结构设计中的作用。

参考文献

- [1] Rioja R J, Liu J. The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2012, 43A: 3325-3337.
- [2] Elagin V I, Zakharov V V. Modern Al-Li alloys and prospects of their development[J]. *Metal Science and Heat Treatment*, 2013, 55(3/4): 184-190.
- [3] Campbell F C. Manufacturing technology for aerospace structural materials: Chapter 2 - aluminum[M]. Oxford: Elsevier, 2006: 15-92.
- [4] Gupta R K, Nayan N, Nagasireesha G, et al. Development and characterization of Al-Li alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 420(1/2): 228-234.
- [5] Ahmed B, Su J W. Aluminum lithium alloys(Al-Li-Cu-X)-new generation material for aerospace applications[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 440: 104-111.
- [6] Zou C L, Geng G H, Chen W Y. Development and application of aluminium-lithium alloy[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 599-601: 12-17.
- [7] Dursun T, Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys[J]. *Materials and Design*, 2014, 56: 862-871.
- [8] Antipov V V, Senatorova O G, Tkachenko E A, et al. High-strength Al-Zn-Mg-Cu alloys and light Al-Li alloys[J]. *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, 53(9/10): 428-433.
- [9] 孙东立, 杨德庄, 雷延权. 铝-锂合金的研究进展[J]. *金属科学与工艺*, 1987, 6(4): 116-133.
Sun Dongli, Yang Dezhuang, Lei Tingquan. Development of the research on aluminum-lithium alloys[J]. *Metal Science & Technology*, 1987, 6(4): 116-133. (in Chinese)
- [10] 吴秀亮, 刘铭, 臧金鑫, 等. 铝锂合金研究进展和航空航天应用[J]. *材料导报*, 2016, 300: 571-578.
Wu Xiuliang, Liu Ming, Zang Jinxin, et al. Research progress and aerospace application of aluminum lithium alloys[J]. *Material Review*, 2016, 300: 571-578. (in Chinese)
- [11] 李红萍, 叶凌英, 邓运来, 等. 航空铝锂合金研究进展[J]. *中国材料进展*, 2016, 35(11): 856-862.
Li Hongping, Ye Lingying, Deng Yunlai, et al. Progress of aircraft Al-Li alloys[J]. *Materials China*, 2016, 35(11): 856-862. (in Chinese)
- [12] 邱惠中. 铝锂合金的发展概况及其应用[J]. *宇航材料工艺*, 1993, 23(4): 38-45.
Qiu Huizhong. Development and application of aluminum-lithium alloy[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 1993, 23(4): 38-45. (in Chinese)
- [13] 魏建锋, 何明. 铝锂合金研制进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 1994, 23(1): 1-6.
Wei Jianfeng, He Ming. Advance on the development of Al-Li alloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 1994, 23(1): 1-6. (in Chinese)
- [14] 杨守杰, 卢健, 冯朝辉, 等. 铝锂合金历史回顾与在中国的研究发展[J]. *材料导报*, 2014, 28(增刊 2): 430-435.
Yang Shoujie, Lu Jian, Feng Zhaohui, et al. The history of Al-Li alloys and the research development in China[J]. *Material Review*, 2014, 28(S2): 430-435. (in Chinese)
- [15] Itoh G, Cui Q, Kanno M. Effects of a small addition of magnesium and silver on the precipitation of T1 phase in an Al-4%Cu-1.1%Li-0.2%Zr alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1996, 211(1/2): 128-137.
- [16] Shi C C, Zhang L, Wu G H, et al. Effects of Sc addition on the microstructure and mechanical properties of cast Al-3Li-1.5Cu-0.15Zr alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 680(6): 232-238.
- [17] Li J F, Ye Z H, Liu D Y, et al. Influence of Pre-deformation on aging precipitation behavior of three Al-Cu-Li Alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica(English Letters)*, 2017, 30(2): 133-145.
- [18] Li J F, Chen Y L, Zhang X H, et al. Role of Pre-deformation on aging precipitation behavior of Al-Cu-Li alloys[J]. *Materials Science Forum*, 2017, 877: 180-187.
- [19] Tao J S, Zhang L, Wu G H, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of extruded Al-4Cu-1Li-0.4Mg-0.4Ag-0.18Zr alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 717: 11-19.
- [20] Ye L Y, Zhang X M, Liu Y W, et al. Effect of two-step aging on recrystallized grain size of Al-Mg-Li alloy[J]. *Materials Science and Technology*, 2011, 27(1): 125-131.
- [21] Fox A G, Fisher R M. The origin of the high elastic modulus in Al-Li alloys[J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1988, 7(3): 301-303.
- [22] Lavernia E J, Srivatsan T S, Mohamed F A. Strength, deformation, fracture behaviour and ductility of aluminium-

- lithium alloys[J]. *Journal of Materials Science*, 1990, 25: 1137-1158.
- [23] Ravindra A, Dwarakadasa E S, Srivatsan T S, et al. Electron-beam weld microstructures and properties of aluminum-lithium alloy 8090[J]. *Journal of Materials Science*, 1993, 28(12): 3173-3182.
- [24] Sankaran K K, Grant N J. The structure and properties of sputter-quenched aluminum alloy 2024 containing lithium additions[J]. *Materials Science and Engineering*, 1980, 44(2): 213-227.
- [25] Srivatsan T S, Coyne E J Jr. Effect of ageing on the elastic modulus of an Al-Li-Mn alloy[J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1987, 6(4): 453-455.
- [26] Feng W X, Lin F S, Starke E A. The effect of minor alloying elements on the mechanical properties of Al-Cu-Li alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1984, 15(6): 1209-1220.
- [27] Peters M, Bachmann V, Welpmann K. Fatigue Behaviour of the Al-Li alloy 8090 compared to 2024[J]. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 1987, 18(8): 277-283.
- [28] Yang D L, Liu Y L, Li S B, et al. Effects of aging temperature on microstructure and high cycle fatigue performance of 7075 aluminum alloy[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2017, 32(3): 677-684.
- [29] Kulkarni G J, Banerjee D, Ramachandran T R. Physical metallurgy of aluminum-lithium alloys[J]. *Bulletin of Materials Science*, 1989, 12(3/4): 325-340.
- [30] Parka G H, Kima J T, Parka H J, et al. Development of light weight Mg-Li-Al alloys with high specific strength[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 680: 116-120.
- [31] Balducci E, Ceschini L, Messieri S, et al. Effects of overaging on microstructure and tensile properties of the 2055 Al-Cu-Li-Ag alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 707: 221-231.
- [32] Eswara Prasad N, Srivatsan T S, Wanhill R J H, et al. Chapter 11-fatigue behavior of aluminum-lithium alloys [M]. Boston: Butterworth-Heinemann, 2014: 341-379.
- [33] Di Z, Saji S, Hori S. Effect of microstructure on high cycle fatigue behaviour of AL-Li binary alloy[J]. *Le Journal de Physique Colloques*, 1987, 48(C3): 753-759.
- [34] Alexopoulos N D, Migklis E, Stylianos A, et al. Fatigue behavior of the aeronautical Al-Li(2198) aluminum alloy under constant amplitude loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2013, 56: 95-105.
- [35] Venkateswara Rao K T, Ritchie R O. Fatigue crack propagation and cryogenic fracture toughness behavior in powder metallurgy aluminum-lithium alloys [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1991, 22(1): 191-202.
- [36] Venkateswara Rao K T, Ritchie R O. Effect of prolonged high-temperature exposure on the fatigue and fracture behavior of aluminum-lithium alloy 2090[J]. *Materials Science and Engineering*, 1988, 100: 23-30.
- [37] Chaturvedi M C, Chen D L. Effect of specimen orientation and welding on the fracture and fatigue properties of 2195 Al-Li alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 387-389: 465-469.
- [38] Starke E A, Sanders T H, Palmer I G. New approaches to alloy development in the Al-Li system[J]. *Journal of Metals*, 1981, 33(8): 24-33.
- [39] Alexopoulos N D, Migklis V, Kourkoulis S K, et al. Fatigue behavior of aerospace Al-Cu, Al-Li and Al-Mg-Si sheet alloys [J]. *Advanced Materials Research*, 2015, 1099: 1-8.
- [40] Starke E A. Aerospace materials for future technologies [J]. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 2001, 51(2): 77-85.
- [41] Venkateswara Rao K T, Ritchie R O. Fatigue of aluminum-lithium alloys[J]. *International Materials Reviews*, 1992, 37(4): 153-185.
- [42] Klysz S. Transformation of the S-N curves for Al 2024 alloy[J]. *Journal of Konbin*, 2014, 32(1): 19-36.
- [43] Srivatsan T S, Yamaguchi K, Starke E A. The effect of environment and temperature on the low cycle fatigue behavior of aluminum alloy 2020[J]. *Materials Science and Engineering*, 1986, 83(1): 87-107.
- [44] Khireddine D, Rahouadj R, Clavel M. The influence of and precipitation on low-cycle fatigue behaviour of an aluminium alloy[J]. *Acta Metallurgica*, 1989, 37(1): 191-201.
- [45] Eswara Prasad N, Malakondaiah G, Kutumbarao V V, et al. In-plane anisotropy in low cycle fatigue properties and bilinearity in Coffin-Manson plots for quaternary Al-Li-Cu-Mg 8090 alloy plate[J]. *Materials Science and Technology*, 1996, 12(7): 563-577.
- [46] Lewandowska M, Mizera J, Wyrzykowski J W. Low-cycle fatigue behaviour of the model Al-Li-Zr and Al-Li-Cu-Zr alloys [J]. *Materials Science Forum*, 1996, 217-222: 1359-1364.
- [47] 艾素华, 吴细毛, 张匀. S'和 T2 相对 8090 铝锂合金低周疲劳行为的影响[J]. *机械工程材料*, 1998, 22(2): 6-9.
- Ai Suhua, Wu Ximao, Zhang Yun. Effect of precipitated phase S' and T2 on the low cycle fatigue behavior of 8090 Al-Li alloy [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 1998, 22(2): 6-9. (in Chinese)
- [48] Oh Y J, Lee B S, Kwon S C, et al. Low-cycle fatigue crack initiation and break in strain-life curve of Al-Li 8090 alloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1999, 30(3): 887-890.
- [49] Eswara Prasad N, Malakondaiah G, Rama Rao P. Low cycle fatigue behaviour of an underaged Al-Li-Cu-Mg alloy [J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2004, 57(2): 181-194.
- [50] Cavaliere P, Cabibbo M, Panella F, et al. 2198 Al-Li plates joined by friction stir welding: mechanical and microstructural behavior[J]. *Materials and Design*, 2009, 30(9):

- 3622-3631.
- [51] Srivatsan T S, Coyne E J. Micromechanisms governing fatigue behaviour of lithium containing aluminium alloys[J]. *Metaterials Science and Technology*, 1989, 5(6): 548-555.
- [52] Khireddine D, Khireddine M H. Low cycle fatigue behaviour of an aluminium alloy with small shearable precipitates; effect of surface coating[J]. *International Journal of Fatigue*, 2000, 22(7): 585-591.
- [53] Aliaga D, Barbaux Y, Clavel M, et al. Factors of crack initiation and micro crack propagation in aluminum-lithium 2091 and in aluminum 2024[J]. *Le Journal de Physique Colloques*, 1987, 48(C3): 769-775.
- [54] 陈铮. 铝锂合金疲劳裂纹萌生寿命和短裂纹扩展抗力[J]. *兵器材料科学与工程*, 1992, 15(6): 15-20.
Chen Zheng. Fatigue crack initiation life and short crack propagation resistance of Al-Li alloys[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 1992, 15(6): 15-20. (in Chinese)
- [55] Wanhill R J H, Bray G H. Aluminum-lithium Alloys Chapter 12-fatigue crack growth behavior of aluminum-lithium alloys[M]. Boston: Butterworth-Heinemann, 2014: 381-413.
- [56] Vasudevan A K, Bretz P E, Miller A C, et al. Fatigue crack growth behavior of aluminum alloy 2020 (Al-Cu-Li-Mn-Cd)[J]. *Materials Science and Engineering*, 1984, 64(1): 113-122.
- [57] Thompson S R, Phillips M A. The mechanical property data base from an air force/industry cooperative test program on advanced aluminum alloys[R]. AD-A230-903, America: Wright Research and Development Center, 1990.
- [58] Park K J, Lee C S. Fatigue crack propagation in Al-Li 8090 alloy at room(300K) and cryogenic(77K) temperatures[J]. *Scripta Materialia*, 1996, 34(2): 215-220.
- [59] Ma Y E. Fracture behavior and crack growth rate of Al-Li alloy friction stir welded joints[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 217-218: 131-136.
- [60] 凌娟. 形变及时效强化对 2198 铝锂合金损伤容限的影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
Ling Juan. Effects of deformation and aging strengthening on damage tolerance of 2198 Al-Li alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [61] Manabu N, Eto T. Effect of constituents and dispersoids morphology on fracture toughness and fatigue crack propagation rate in 2024 aluminum alloys[J]. *Materials Science Forum*, 1996, 217-222: 1517-1522.
- [62] Lee C S, Li D M, Kim N J, et al. Effects of temperature on the fatigue crack growth of an Al-Li 8090 alloy with microstructure[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1997, 28(4): 1089-1093.
- [63] Betsofen S Y, Antipov V V, Knyazev M I. Al-Cu-Li and Al-Mg-Li alloys: phase composition, texture, and anisotropy of mechanical properties[J]. *Russian Metallurgy(Metally)*, 2016(4): 326-341.
- [64] Venkateswara Rao K T, Yu W, Ritchie R O. Fatigue crack propagation in aluminum-lithium alloy 2090; Part I. Long crack behavior[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1988, 19(3): 549-561.
- [65] Ritchie R O. Crack tip shielding in fatigue[J]. *Mechanical Behaviour of Materials V*, 1988: 1399-1417.
- [66] Venkateswara Rao K T, Ritchie R O. Fatigue-crack propagation in advanced aerospace materials; aluminum-lithium alloys[C]. *Proceedings of the 7th International Conference on Fracture (ICF7)*. Houston: Pergamon, 1989: 3787-3816.
- [67] Lawson L, Chen E Y, Meshii M. Near-threshold fatigue: a review[J]. *International Journal of Fatigue*, 1999, 21: S15-S34.
- [68] 范雪松, 郑子樵, 张龙, 等. 2397 合金高周疲劳性能及裂纹萌生扩展行为[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(5): 1327-1333.
Fan Xuesong, Zheng Ziqiao, Zhang Long, et al. High-cycle fatigue properties and crack initiation and propagation behavior of 2397 alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(5): 1327-1333. (in Chinese)
- [69] 陈国庆, 柳峻鹏, 树西, 等. 铝合金焊接工艺的研究进展[J]. *焊接*, 2017(9): 7-12.
Chen Guoqing, Liu Junpeng, Shu Xi, et al. Research progress of aluminum alloy welding process[J]. *Welding and Joining*, 2017(9): 7-12. (in Chinese)
- [70] 崔德刚. 浅谈民用大飞机结构技术的发展[J]. *航空学报*, 2008, 29(3): 573-582.
Cui Degang. Structure technology development of large commercial aircraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(3): 573-582. (in Chinese)

作者简介:

李 飘(1993—),女,博士研究生。主要研究方向:铝锂合金及镍基单晶合金疲劳及断裂性能。

姚卫星(1957—),男,博士,教授,博导。主要研究方向:飞行器结构疲劳、断裂、优化设计。

(编辑:马文静)