• 今日铸造 Today Foundry •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.07.023

高性能铝锂合金的研究进展及其应用

于以标[1,2],陈乐平[1,2],徐 勇[1,2]
(1. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063;2. 南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室,江西 南昌 330063)

摘 要:铝锂合金具有良好的比强度、比刚度和抗疲劳性能,在航空航天领域得到了广泛的应用,已成为近期研究的热点。梳理了铝锂合金的开发历程和典型应用,介绍了铝锂合金在材料设计、制备和加工成型等领域的研究进展,并展望了铝锂合金应用前景和发展趋势。

关键词:铝锂合金;成分设计;制备方法;热处理;加工成型
中图分类号:TG146.2 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)07-0687-06

Research Progress and Application of High-performance Aluminum-lithium Alloy

YU Yibiao[1,2], CHEN Leping[1,2], XU Yong[1,2]
(1. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. National Defense Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hang hang University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Aluminum-lithium alloy has been widely used in the field of aeronautics and astronautics due to its good specific strength, specific stiffness and fatigue resistance. The development process and typical application of Al-Li alloy are reviewed, the research progress of al-li alloy in material design, preparation and processing is introduced, and the application prospect and development trend of Al-Li alloy are prospected.

Key words: aluminum lithium alloys; chemical design; preparation method; heat treatment; processing forming

铝锂合金在航空航天领域备受关注,因为航空航天器对选用的材料具有严格的轻量化要求,通常选用轻质、高强的材料为主,例如复合材料、钛合金和镁合金等[1]。锂元素是最轻的金属元素,在铝合金中添加锂元素后合金的密度减小、比强度与比刚度提高,并且还具有较好的抗腐蚀性和抗疲劳性等特点。文献[2]表明每 1%的锂添加到铝合金中,合金的弹性模量提升 6%,密度降低 3%,铝锂合金在减重效果上拥有巨大潜力,所以被大量地应用在航空航天设备的研发和生产中。

1 铝锂合金的发展历程及其应用

在 20 世纪的 20 年代,德国的科研人员发现:锂在铝合金中拥有很高的溶解度,于是开始尝试在铝合金中添加锂元素。经过长时间的探索,最初的铝锂合金(Al-12Zn-3Cu-0.6Mn-0.1Li)在 1924 年被成功研制[3]。不过锂元素所占比重非常少,对合金的性能并没有明显的改进,因此,当时的学者不看好铝锂合金的研究。由于能源危机的到来许多航空航天领域的科研人员开始研发更轻型与强度更高的材料,铝锂合金的减重潜力再次被人们所关注。许多国家对铝锂合金的研发开始重视,此后铝锂合金的性能得到了巨大的改变,并且在航空航天领域的应用上大放光彩。

1.1 美国铝锂合金的发展

铝锂合金研发过程中,美国一直是处于领先的状态,美国对铝锂合金的研究有着悠久的历史,并且是最早将铝锂合金应用于航空航天领域的国家之一。在 1927 年美国研究人员开发出第一项铝锂合金专利 Al-Li(<40%Li 和<0.5%Li)),虽然产品的效果不太理想,但给未来铝锂合金的研究开拓了道路。

铝锂合金初期的研究进展缓慢,直到 1941 年美国的研究员 Le Baron 在铝锂合金力性能上取得了突破,提出了 Al-Cu-Li-X 合金专利。但在使用价值

收稿日期:2020-04-26
基金项目:轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室基金(G201903068)
作者简介:于以标(1995-),江西南昌人,硕士研究生.研究方向:高性能铝锂材料制备技术及应用研究.
电话:18379155919,E-mail:1083423594@qq.com
通讯作者:陈乐平(1964-),江西南昌人,教授.研究方向:金属材料和铸造技术研究.电话:0791-83863027,
E-mail:jnnclp@163.com

上遭受同一时期 7050 铝合金的打击，铝锂合金研究进展再次放缓。第一代被认可的铝锂合金，是 1958 年美国 Alcoa 公司生产的 2020 铝锂合金。2020 合金的性能较最初的铝锂合金提升显著，被应用于海军 RA-5C 飞机的主翼以及蒙皮上，减重效果达到 6%，但合金存在延展性差和断裂性低等问题[4]。因为当时工艺落后，原材料含有较多的杂质元素 Fe、Si 等，引起大尺寸第二相 $Al_{12}(FeMn)_3Si$ 的析出，导致裂纹源的产生进而影响材料的断裂韧性[5]。虽然 2020 铝锂合金实践效果备受争议，但因石油资源的紧缺，铝锂合金的研究并未停滞。在 20 世纪 70 年代到 80 年代美国研制出低密度、中强度系列的铝锂合金，这一系列合金具有较低的密度、较好的耐损伤性和不错的比强度。2090 合金是该系列合金的代表，其载荷达到了航空标准，被应用于美国波音公司的 B-747 的起落架处，减重效果约为 7%[6]。此外 5 架 MD-1J 喷气式飞机的地板梁也采用 2090 合金，机身减重达 140 kg[7]。不过这一系列合金存在塑韧性水平低，各向异性等问题，严重影响了飞行器的工作性能。

在 20 世纪 90 年代以后，美国加大了对铝锂合金的研究力度。研发出多款高韧性、高强度和良好损伤容限等特点的铝锂合金，如 2050、2195 和 2297 等牌号。这些合金分别被应用于 A350XWB 的翼肋腹板、奋进号航天飞机外贮箱和 F16 战斗机等设备上[4]。近年美国研制出第 4 代铝锂合金，其具有超高强度、耐容损和良好可焊性等特点，例如 2060 铝锂合金在我国 C919 客机上被大范围采用，整个铝锂合金的使用量达到飞机重量 10%[8]。上述介绍的铝锂合金成分如表 1。铝锂合金不仅凭借高性能的特点逐渐适用于航空航天领域，更通过减重效果给行业带来巨大经济效益。纵观铝锂合金的发展历程，美国始终走在前沿，但其他国家也在紧紧跟进。

1.2 俄罗斯铝锂合金的发展

俄罗斯在铝锂合金发展的地位属于后起之秀，在前苏联时便表现出强大的研发能力，多年的科研积累使其在 Al-Mg-Li 系铝锂合金的研究中独树一帜。1961 年前苏联仿照美国 2020 合金研制出 1230 合金，两者的成分均为 Al-Cu-Li-Mn 系合金，1230 合金属于前苏联最早一批研究成果，因断裂韧性差未得到具体应用[9]。

同期前苏联还开发出 1420 铝锂合金，属于 Al-Mg-Li 系合金，具有较高的比刚度以及较好的焊接性与耐腐蚀性等特点，被应用于米格 29 的焊接壳体和座舱中。此外，1420 合金在 1980 年后还被应用于 MIG-29 等超音速战斗机上，其在航空领域中的竞争力被充分肯定。但由于强度较差，前苏联开发了其替代品 1460 铝锂合金。1460 合金与美国的 2090 合金具有类似的成分，但不同工艺的处理使其获得了更高的强度，此外 Sc 元素的添加让其拥有良好的低温性能。出色的性能让 1460 合金特别适宜于航天领域，曾服役于能源号运载火箭贮箱，对大型运载火箭减重效果明显[4-10]。俄罗斯研制的铝锂合金产品拥有自己的特色，在铝锂合金的舞台中扮演着重要角色。

1.3 其他西方国家铝锂合金的发展

铝锂合金历程中还有许多国家的身影，他们共同推动铝锂合金的发展。当铝锂合金显现出足够的经济效益后，英国是继美、俄两国之后第 3 个从事铝锂合金研究的国家。1955 年英国的 Hardy 和 Silcock 发现了亚稳相 δ'(Al3Li) 的强化作用，这推动了 Al-Cu-Li 系铝锂合金的发展[8]。1980 年英国研制出具有中等强度和良好断裂韧性的 8090 铝锂合金，Westland 的 EH101 直升机与波音 777 均采用了该合金。之后英国还推出升级版的 8091 与 8093 铝锂合金，弥补了 8090 铝锂合金强度不足的问题。随着燃料价格的上涨和对飞行器轻质化的追求，多个国家也开始投入到铝锂合金的研发当中。法国的 Pechincy 公司经过长期的摸索，研发出 2091 铝锂合金，并将其应用于导弹壳体。加拿大投入大量财力后，研制出性能优良的第 3 代铝锂合金 2196 和 2198，分别被 A380 和 A350 飞机采用。

1.4 我国铝锂合金的发展

我国 20 世纪 60 年代开始从事铝锂合金的研

表1 美国部分铝锂合金的牌号和成分 w(%)

Tab.1 Grades and chemical composition of some aluminum–lithium alloys in the United States

牌号	Li	Cu	Mg	Mn	Ag	Zn	Zr	Al
2020	1.1	4.5	-	0.5	-	0.20	-	Bal
2090	1.9~2.6	1.9~2.6	2.40~3.00	-	-	0.10	0.08~0.15	Bal
2050	0.7~1.3	0.7~1.3	0.20~0.60	0.2~0.5	0.2~0.7	0.25	0.20~0.60	Bal
2195	0.8~1.2	0.8~1.2	0.25~0.80	0.2~0.2	0.2~0.7	0.25	0.08~0.16	Bal
2297	1.1~1.7	1.1~1.7	0.25	0.1~0.5	-	0.05	0.08~0.15	Bal
2060	0.6~0.9	0.6~0.9	0.60~1.10	0.1~0.5	0.05~0.5	0.40	0.60~1.10	Bal

究，由东北轻合金加工厂仿制 2020 铝锂合金，因条件限制未实现生产和应用[8]。为提升我国航空领域发展，在“七五”期间，通过国家立项由中南大学、东北大学、航天 703 所等机构进行铝锂合金的联合研发，此时我国铝锂合金的研究正式起步。“八五”期间更多大学和研究所投入到铝锂合金的基础研究中，其中西南铝加工厂在铝锂合金的熔铸方向成果显著，建成 1T 级的熔炼机组。在 1999 年多所机构联手攻克了“高强铝锂合金研究”国家科研任务，分析出 WeldaliteTM049 合金最佳工艺状态的性能规律，加速了我国对铝锂合金组织强化的研究进展。2000 年我国克服了 2195 铝锂合金的生产问题，在大规格薄壁管材料制造方面取得突破，体现出我国在铝锂合金工业生产的突飞猛进[11]。

在对铝锂合金多年研究的基础上，我国自主研制的铝锂合金有 5A90、2A97 和 X2A66 等牌号。5A90 铝锂合金具有中等强度、良好焊接性能等特点，被应用于长征 2 号火箭舱体和导弹壳体[9]。杨守杰等对 2A97 铝锂合金进行不同温度拉伸性能分析（如表 2），因其具有低密度、比强度高等性能特点，是制造飞机框梁结构和机翼下壁板的理想材料[12]。X2A66 铝锂合金是我国研制出的第 4 代铝锂合金（成分如表 3），具有高强高韧、耐容损、耐腐蚀等性能特点，该合金非常适合制造整体壁板结构[13]。铝锂合金的研究加速了我国航空航天领域的发展，如天宫一号、嫦娥一号、长征系列火箭等，这些设备上都可以看到铝锂合金的身影。我国在铝锂合金的研发、生产和应用方面与国外还存在差距，但强劲的发展势头和大量的研究成果让差距逐渐减小。

表 2 2A97-T851 厚板的低温和高温拉伸性能
Tab.2 The tensile properties of 2A97-T851 plate under different temperatures

合金	厚度	方向	温度	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ/MPa	δ_s(%)
2A97-T851	40 mm	LT	100 ℃	474	539	14.8
			125 ℃	462	516	15.8
			150 ℃	443	484	17.7
			175 ℃	399	430	15.6
			-70 ℃	536	608	8.7

表 3 X2A66 铝锂合金的成分 w(%)
Tab.3 Chemical composition of X2A66 alloy

牌号	Li	Cu	Mg	Mn	Zn	Zr	Al
X2A66	1.3~1.8	3.5~4.1	0.2~0.6	0.2~0.6	0.2~0.8	0.08~0.16	Bal

2　铝锂合金研究的主要进展

经历了 4 个阶段，90 多年的发展，铝锂合金无论是在基础科学还是应用技术方面都取得了巨大成就。本文仅从材料设计、合金的熔炼、微观组织和加工成型等方面的主要研究进展加以简要介绍。

2.1　合金化

在铝锂合金的研究过程中主要的手段为优化合金的成分，通过改变合金的元素成分或者添加其他的微量元素，合金的强度、塑性和韧性都会得到显著的改善。铝锂合金中主要的添加元素有 Li、Cu 和 Mg，此外为了提高合金的综合性能还会加入一些微量的元素 Ce、Ti、Ag、Mn、Zr 等[6]。例如第 2 代铝锂合金添加锂元素相对较高，约占 2.0%~2.4%。增大锂元素的占比可以提高合金强度与刚度，但也带来严重的缺陷，包括较低的塑性和断裂韧性，受热后的材料会有韧性降低等问题。第三代铝锂合金吸取经验，将锂元素的比重控制在 1.0%~1.8%，使得合金性能均衡，在拥有较高比强度的同时应用方面更具适应性[14]。

添加 Cu 元素，有利于铝锂合金强化相的析出，但并不是 Cu 的含量越多材料的强韧效果越好。孙景峰[15]发现 Cu/Li 的比例不同对合金析出相具有明显的变化，它会影响到析出相的种类以及析出相的顺序。比如 1460 合金中 Cu/Li 的比例与 2090 相比较，具有更加丰富的析出相，合理的比例提高了合金的强度并且拥有良好的耐腐蚀性能。Mg、Ag 元素对合金起到固溶强化的作用，其中 Mg 元素可以增加 δ' 相的含量，还起到提升材料高温性能的效果；Ag 元素的强化效果并不显著，但其添加量影响 Al-Li-Cu 系合金析出相的顺序[6]。

此外，许多学者对铝锂合金中添加稀有元素也进行了大量研究，Chen 等[16]将微量的 In 添加到铝锂合金中，实验结果显示合金的屈服强度提升明显，相比原合金增加 25%。这是因为 In 的添加导致了合金中锂的溶解度提升，为合金析出相 T1 相的形成提供良好的条件。

2.2　熔炼与凝固反应

铝锂合金熔炼过程十分困难，主要原因是锂元素非常的活泼[17]，极易发生氧化生成氧化夹杂物，并且还有吸氢现象造成合金氢脆问题。氢主要以原子氢、分子氢和氢化物的形式存在于铝当中，杂质氢会造成合金韧性和塑性降低，其来源有 2Al（液）+3$H_2$0（汽）=γAl_2O_3+3H_2 或者 2Al（液）+3$H_2$0（汽）=$\gamma A1_2O_3$+6H[18]。此外，受工艺限制添加的金属锂纯度不足，往往会引入 Na、K、Ca 等杂质元素，使铝锂合金的性能降低。

为了保证铝锂合金的熔炼质量，通常采用覆盖剂保护法和真空熔炼法。

（1）覆盖剂保护法　通过熔剂覆盖于熔融的

金属液表面，形成隔绝空气和水蒸气的保护膜，阻止金属液和外界发生反应。一般熔剂需要具备不与金属液反应、熔点低、良好的流动性等特点，此外熔剂密度要低，方便浮于金属液表面。熔炼铝锂合金时熔剂不仅可以隔绝大部分空气和水蒸气中的氢，还可以吸附金属液中的氢和氧化夹杂物，减少污染的同时起到精炼的作用。

(2)真空熔炼法　铝锂合金熔炼不同于一般的铝合金，普通铝合金采用陶土坩埚即可，铝锂合金需要采用石墨坩埚。因为锂元素具有非常强的还原性，一般的耐火材料，如 Al_2O_3、SiO_2、Na_2O、ZnO 等，均会发生置换反应。采用石墨坩埚在真空条件下熔炼，可以避免坩埚与金属液反应产生污染合金的杂质[18]。卢健[19]等对 5A90 铝锂合金的真空熔炼实验表明，真空条件可以有效的去除 H、Na、K 等杂质。

铝锂合金制造生产一直是个难题，制造方式同传统铝合金一样，但锂元素的存在使铝锂合金制备的成品率低。经过对铝锂合金制备的长期摸索，现采用两类成熟的合金生产方法：铸锭冶金法(IM 法)，粉末冶金法(PM 法)。

(1)铸锭冶金法(IM 法)　这种方法是将融化的金属液浇入铸型中，根据金属液固转变的特性获得铸件。在铝锂合金的生产中美国的 Alcoa、法国的 Pechiney、俄罗斯等都采用铸锭冶金法，它具有成本低、生产效率高、产品外形不受限制的优点。铝锂合金采用这个方法还需要加惰性气体，防止合金被氧化影响铸件质量[20]。

(2)粉末冶金法(PM 法)　该方法以金属粉末为原料，通过压制成形、烧结和必要的后续处理等手段来制取金属材料和制品。生产的零件具有较高的强度，并且能够消除普通铸件常见的气孔、缩松和缩孔缺陷。在铸锭冶金法中铝锂合金中锂的含量不超过 3%，利用快速粉末冶金法锂的含量可以到达 4%[21]。

2.3　微观组织和热处理

铝锂合金性能取决于微观组织的构成，研究微观组织的转变规律可以更好掌握铝锂合金的性能变化，为铝锂合金的工业生产提供理论支持[22]。铝锂合金体系中母材可以析出多种强化相。其中主要的有 T1 相(Al_2CuLi)、δ' 相(Al_3Li)、S′ 相(Al_2CuMg)和 θ' 相(Al_2Cu)[23]。各种强化相的形貌和分布如图 1 所示[24]。其中 T1 相在铝锂合金中析出最多，为六方结构，外形呈片状或盘状，一般析出于位错与晶界处，与基体存在惯析关系，能有效提高合金的屈服强度和极限强度[25]；δ' 相(Al_3Li)是提升铝锂合金弹性模量的主要因素，呈球状，δ' 相在变形时易被位错从中切过，增加共面滑移的产生[26]；S′ 相(Al_2CuMg)与基体呈半共格关系，为斜方结构，对位错的交滑移有益可以减少合金的共面滑移，对合金强度和塑性均有改善效果；θ' 相(Al_2Cu)是一种亚稳相，具有正方结构，属 2XXX 系铝锂合金常见的强化相[9]。

铝锂合金作为一种时效强化合金，可以通过热处理转变组织和织构提高性能(如图 2)[27]。Zhang 等[28]对 2099 合金试样进行热处理，发现合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 342.4 MPa、265.3 MPa 和 9.5%，其拉伸性能得到了显著的提升。其树枝状结构的溶解导致了基体的溶质上升，在适宜的温度下发生固溶强化提升了合金的强度。

2.4　加工成型

早期铝锂合金加工技术十分落后，是限制铝锂合金发展的原因之一。随着铝锂合金需求量的增加和生产工艺的进步，铝锂合金的加工技术迅速提升。例如：超塑成形、搅拌摩擦焊和蠕变时效成形技术等。

超塑成形是一种新的材料成型技术，利用一定的变形温度和适当的变形速率对合金进行加工成型。铝锂合金在室温的条件下加工常出现微孔、分层、断裂等问题，超塑性成型技术可以克服铝锂合金在室温条件下的加工问题，处理后的材料具有细小

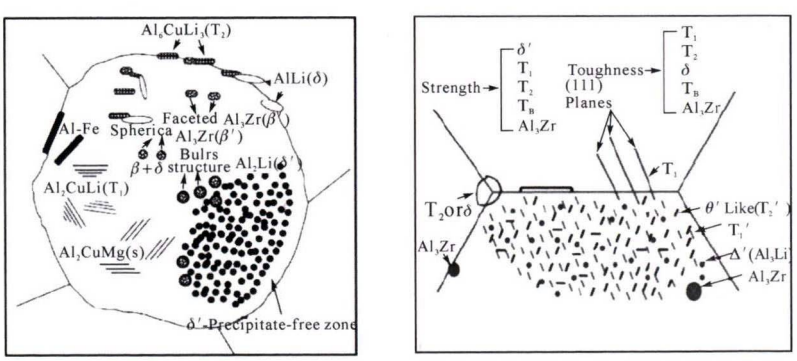

图 1 Al-Cu-Li 合金主要析出相的形貌和分布示意图
Fig.1 The morphology and distribution of the main precipitated phases of Al-Cu-Li alloy

均匀的等轴组织。并且超塑性成型还有成型压力小、可一次精密成型、不存在硬化回弹、尺寸精度高等优点。英国利用超塑成形技术对 8090 合金加工，使其应用于 EVP 战机的起落架舱门。李志强等[29]对 1420 铝锂合金进行超塑性的实验表明，在 480 ℃和 1×10^{-4} s 的拉伸速率下其伸长率可达 550%。

搅拌摩擦焊是通过高速旋转的焊头和塑性材料摩擦使其局部融化，然后在焊头的移动和挤压过程中形成致密的固相焊缝。普通的焊接会产生高温，使铝锂合金中的锂元素烧损，破坏合金的成分。搅拌摩擦焊工作时温度较低，对焊后的材料不会造成过大的残余应力。搅拌摩擦焊与传统的焊接过程不同，它不需要消耗焊接材料。据悉，搅拌摩擦焊替代铆接结构制造蒙皮，可以使飞行器的结构减重 10%左右[30]。

蠕变时效成形技术是利用金属蠕变的特性，将时效强化和加工成型相结合的工艺[31]。蠕变时效成形特别适合于板壁件与大型蒙皮的加工（如图 3）[4]，因此美国 NASA 在 2000 年把该技术列为航空航天器整体机身结构的制造技术之一。欧玲等[32]在 180 ℃的条件下对 2A97 铝锂合金进行了蠕变时效处理，验证了双曲正弦函数等温蠕变本构模型的精确性。

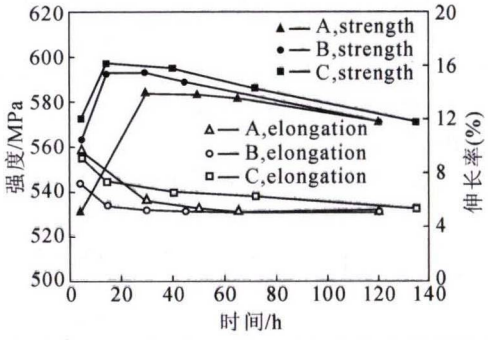

图 2 不同热处理工艺下 2A97 合金拉伸性能与时效时间的关系

Fig.2 Relationship between tensile properties and aging time of 2A97 alloy at different peak-aged conditions

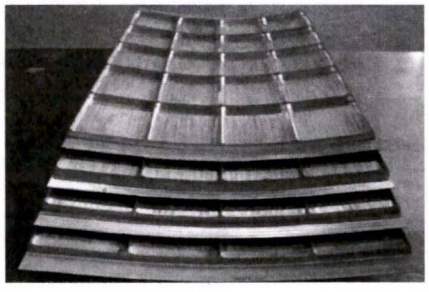

图 3 蠕变时效成形技术制备 ARJ21 改型号飞机保护门

Fig.3 ARJ21 modified aircraft protection door prepared by Creep aging forming technology

3 展望

铝锂合金的性能不断被完善，今后其应用范围不仅仅局限于航空航天领域。在军事方面，美国海军已经考虑在鱼雷结构上采用铝锂合金，比如具有耐腐蚀性和强度较高的 2090、8090 铝锂合金就非常适合应用于鱼雷壳体，而 5091 铝锂合金已经被重型鱼雷燃料箱采用。在民用方面，铝锂合金的弹性模量高于传统铝合金，应用于汽车领域可以提高车身的刚度使汽车钣金的厚度更加合理。近年来福特公司和美国莱特州立大学开始进行铝锂合金应用于汽车领域的研究[33]，日本的联合 Al-Li 集团正在计划，把铝锂合金推广到运输车厢和汽车工业等领域[34]。由于技术的原因，铝锂合金生产成本较高，使其在汽车领域的应用还停留在理论阶段。因此低成本是未来铝锂合金的发展趋势之一，而提高对废料的回收利用可以大幅度降低生产成本。

未来的铝锂合金肯定会逐渐替代传统铝合金，但同样受到 GLARE 层板（铝合金+玻纤的复合材料）和碳纤维等新型材料的威胁[23]。因此笔者认为铝锂合金要保持在航空航天和其他领域的竞争力，需要朝以下几个方面发展：①超低密度的研究，轻质一直是铝锂合金的主打优势，通过对铝锂合金锂含量的探索，做到减小合金密度的同时具有更好的强度和塑韧性；②超强超韧性的研究，早期美国研制的 Weldalite-210 型合金就具有优异的强度，其抗拉强度超过 760 MPa、屈服强度超过 740 MPa，因此铝锂合金在高强度和高韧性方面上的研究具有很大的潜力；③高焊接性能的研究，飞行器使用焊接技术比铆接装配减重效果更佳，但铝锂合金的焊接性能普遍偏差，研究高焊接性能的铝锂合金可以满足新的连接方式。可以看到铝锂合金综合性能还有提高的潜力，其未来的舞台不只是航空航天领域，肯定可以推广应用于民用生活的各个方面。

参考文献：

[1] 谷岩波. 2060 铝锂合金板材温渐进成形工艺研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2018

[2] Rioja, Roberto J, John, et al. The Evolution of Al-Li Base Products for Aerospace and Space Applications[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2012,43(9): 3325-3337.

[3] 王浩军，史春玲，贾志强，等. 铝锂合金的发展及研究现状[J].热加工工艺，2012，41(14): 82-85.

[4] 徐进军，康唯，都昌兵，等. 航空航天铝锂合金及其成形技术的研究现状和发展趋势 [J]. 兵器材料科学与工程，2017，40(3): 132-137.

[5] E.A.Starke，J T Staley. Application of modern aluminum alloys to aircraft [J]. Progress in Aerospace Sciences, 1996, 32 (2-3) :

131-172

[6] 周昌荣,潘青林,朱朝明, 等. 新型铝锂合金的研究和发展[J]. 材料导报,2004(5): 30-32.

[7] 刘斌,陈铮铮,顾冰芳, 等. 铝锂合金的发展与应用[J]. 现代机械,2001(4): 71-74,39.

[8] 冯朝辉,于娟,郝敏, 等. 铝锂合金研究进展及发展趋势[J]. 航空材料学报,2020,40(1):1-11.

[9] 吴国华,孙江伟,张亮, 等. 铝锂合金材料研究应用现状与展望[J]. 有色金属科学与工程,2019,10(2): 31-46.

[10] 何代惠, 蒋呐. 俄罗斯的铝锂合金工业 [J]. 铝加工,1999(2): 48-54.

[11] 尹登峰, 郑子樵. 铝锂合金研究开发的历史与现状 [J]. 材料导报,2003(2): 18-20.

[12] 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:纳米与新材料专辑, 2014, 28(2): P.430-435.

[13] 翟彩华,冯朝辉,柴丽华, 等. 铝锂合金的发展及一种新型铝锂合金 -X2A66[J]. 材料科学与工程学报, 2015(2):153-158.

[14] 余东梅. 铝锂合金在航空结构设计中的应用 [J]. 铝加工,2018(6): 4-9.

[15] 孙景峰,郑子樵,林毅, 等. 2060 合金 FSW 接头微观组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报,2014,24(2): 364-370.

[16] Chen Z , Zheng Z . Microstructural evolution and ageing behaviour of the low Cu:Mg ratio Al-Cu-Mg alloys containing scandium and lithium[J]. Scripta Materialia, 2004, 50(7): 1067-1071.

[17] Sadoway D R . Toward new technologies for the production of lithium[J]. Jom, 1998, 50(5): 24-26.

[18] 甄萍. 8090 铝锂合金的制备工艺及性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.

[19] 卢健,马越,高文理, 等. 5A90 铝锂合金真空熔炼工艺研究[J]. 铸造设备与工艺, 2009(2): 27-29.

[20] 王常春,闵光辉,陆政, 等. 铸造 Al-Li-Cu 合金的组织与性能[J]. 铸造技术, 2002(4): 52-54.

[21] 张伟成, 张淑荣. 快速凝固粉末冶金铝锂合金的制造工艺及其性能 // 中国金属学会 98 冶金过程物理化学学术会议 [Z]. 昆明, 1998.

[22] 莫兵. 时效处理对铝锂合金微观组织与力学性能的影响 [J]. 铸造技术, 2015, 36(6): 1461-1463.

[23] Wanhill, R J H. Aerospace Applications of Aluminum-Lithium Alloys[M] Aluminum-lithium Alloys. 2014.

[24] Abd El-Aty A, Xu Y, Guo X, et al. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al-Li alloys: A review [J]. Journal of Advanced Research, 2017: S2090123217301315.

[25] Gayle F W, Heubaum F H, Pickens J R, et al. Structure and properties during aging of an ultra-high strength Al-Cu-Li-Ag-Mg alloy [J]. Scripta Metallurgica Et Materialia, 1990, 24(1): 79-84.

[26] El-Aty A A, Xu Y, Guo X, et al. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al-Li alloys: A review [J]. Journal of Advanced Research, 2017, 10(C): 49-67.

[27] 林毅,郑子樵,韩烨, 等. 热处理工艺对 2A97 铝锂合金拉伸性能和腐蚀性能的影响 [J]. 中国有色金属学报,2012,22(8): 2181-2186.

[28] Zhang F, Shen J, Yan X D, et al. Homogenization heat treatment of 2099 Al-Li alloy[J]. 稀有金属(英文版), 2014, 33(1): 28-36.

[29] 李志强,张艳苓,王耀奇, 等. 细晶 1420 铝锂合金超塑变形行为[J]. 塑性工程学报,2013,20(6): 98-102.

[30] 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,2016,30(S2): 571-578,585.

[31] Zhan L, Lin J, Dean T A, et al. A review of the development of creep age forming: Experimentation, modelling and applications [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(1): 1-17.

[32] 欧玲,聂宇峰. 2A97 铝锂合金蠕变本构模型的建立[J]. 塑性工程学报,2012,19(5): 16-19.

[33] Lipsitt H A, Sherman A M. Lightweight Aluminum Alloy Design Methodology[J]. Advanced Materials & Processes, 2001, 159(10): 37-39.

[34] 黄光杰,汪凌云. 铝锂合金的发展、应用和展望[J]. 材料导报, 1997(2): 21-24.

技术资料邮购

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

本书由西安理工大学魏兵教授编著。共8章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书320页。

特快专递邮购价：226元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071　　技术咨询：13609155628