



铝锂合金制备及强韧化研究进展

邝泉波¹, 王日初^{1,2}, 彭超群¹, 蔡志勇¹, 冯艳¹, 王小锋¹

(1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 轻质高强结构材料重点实验室, 长沙 410083)

摘要: 铝锂合金具有低密度、高强度、高弹性模量和良好耐蚀性等优点, 已广泛应用于航空航天、军事工业等领域。本文对铝锂合金的发展历程及应用情况进行概述; 介绍了铝锂合金的制备工艺, 包括熔炼铸造法、粉末冶金法和喷射沉积法; 重点对铝锂合金强韧化机制及方法进行归纳和总结, 并对铝锂合金的研究和发展进行展望。

关键词: 铝锂合金; 制备方法; 合金化; 强韧化; 热处理

文章编号: 1004-0609(2022)-08-2139-21

中图分类号: TG146.21

文献标志码: A

引文格式: 邝泉波, 王日初, 彭超群, 等. 铝锂合金制备及强韧化研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(8): 2139-2159. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42308

KUANG Quan-bo, WANG Ri-chu, PENG Chao-qun, et al. Research progress on preparation and obdurability of aluminum-lithium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(8): 2139-2159. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42308

铝锂合金通常是指Li含量1%~4% (质量分数,下同)的二元或多元铝合金。由于Li在合金中并非最高含量的添加元素, 一般将含Li元素的铝合金统称为铝锂合金。Li的密度仅为0.534 g/cm³, 是降低铝合金密度最有效的合金元素。研究表明^[1-2], 铝合金中每添加1%Li, 可使合金密度降低3%, 弹性模量增加6%, 并可获得显著的时效强化效果。采用铝锂合金代替传统2000系和7000系铝合金, 可使飞机零部件质量减轻10%~20%, 材料刚度提高15%~20%^[3]。与复合材料相比, 铝锂合金可以降低制造成本, 减小生产危险性, 获得更好的轻量化效果^[4]。除了质量轻、弹性模量高、比强度和比刚度高等优点外, 铝锂合金还具有较高的断裂韧性和良好的耐蚀性能。因此, 铝锂合金被认为是21世纪最具有应用前景的航空航天结构金属材料之一。

1 铝锂合金的发展及应用

根据合金成分及物相组成, 铝锂合金的发展历程可以划分为3个阶段。第1阶段, 对应时间大致为1950—1960年。尽管早在1924年, 德国科学家就通过在Al-Zn-Cu-Mn合金中添加少量Li (0.1%), 成功研制出Scleron铝合金^[5]。但是当时并没有明确Li元素对铝合金的强化作用, 同时由于7000系铝合金在航天飞行器应用上占主导地位, 铝锂合金的出现并没有得到重视。直到美国Alcoa公司成功研制出2020合金(Al-4.5Cu-1.0Li-0.8Mn-0.5Cd)苏联ВДА23合金(Al-5Mg-2Li-0.5Mn)出现, 铝锂合金才获得人们的广泛关注。美国采用2020合金制造海军RA-5Cvigitante预警飞机的机翼, 代替7075铝合金, 使单架飞机获得6%的质量减轻效果^[6]。这两

种合金是第1代铝锂合金的典型代表。然而,第1代铝锂合金的塑性较差,缺口敏感性高,生产加工难度大且价格昂贵,难以满足新航空设计要求,这些合金未取得进一步的应用^[7]。20世纪60年代末,Alcoa公司正式停止商用2020合金的生产。

第2阶段,铝锂合金快速发展时期,对应时间为1970—1980年。第2代铝锂合金的研发目标是获得比传统2024和7075铝合金更轻的质量和更高的强度,满足航空航天工业对轻量化的需求。其中,有代表性的合金有美国的2090合金(Al-2.2Li-2.7Cu-0.12Zr),法国的2091合金(Al-2.0Li-2.3Cu-1.5Mg-0.12Zr),英国的8090合金(Al-2.4Li-1.2Cu-0.8Mg-0.12Zr)以及苏联的1420合金(Al-2.1Li-5.2Mg-0.12Zr)、1421合金(Al-2.2Li-5.3Mg-0.1Zr-0.21Sc-0.25Mn)和1423合金(Al-2.0Li-3.0Mg-0.1Zr-0.1Sc),这些合金获得了一定范围的应用。2090-T86挤压型材和2090-T81板材代替7075-T6合金,应用在C-17运输机和F-18飞机探测器盖上^[8];8090用于制造Atlas载荷舱^[9];8090-T87和8090-T81代替2024-T3合金在EFA2000战斗机、EH101直升机和A330/340大客机上实现了批量应用^[10-11]。1971年,1420合金成为轻型直升机的主要结构材料,用于制备Mig-29、Su-27和Su235等战斗机机身以及一些中、远程导弹壳体^[12]。出于轻量化的目的,第2代铝锂合金中Li元素含量普遍较高(>2%)。与传统铝合金相比,第2代铝锂合金可以使质量减轻7%~15%,弹性模量提高10%~16%^[13]。经过20世纪80年代快速发展,人们在铝锂合金方面取得了大量的研究和应用成果。但是第2代铝锂合金存在韧性差、各向异性等问题,而且合金冷成形性差,变形加工过程中合金容易发生开裂,同时合金裂纹敏感性高、热稳定性差,这些问题限制了第2代铝锂合金在航空航天工业中的大规模应用^[14-15]。

第3阶段,铝锂合金新发展及大规模应用时期,起始于20世纪90年代。针对第2代铝锂合金存在的问题,欧美和俄罗斯等国家通过对合金成分、组织演变、强韧性匹配及制备技术的深入研究,在铝锂合金成分设计时降低合金中Li和Mg元素含量,同时加入多种微合金元素,开发出一系列具有优良综合性能的铝锂合金,合金密度比常规铝合金降低5%~8%^[16]。目前,已开发的第3代铝锂合金包括高强可焊型1460合金(Al-2.9Cu-2.2Li-0.1Sc)

和Weldalite 049系列合金,高韧型2097合金(Al-2.8Cu-1.5Li-0.35Mg-0.35Zn-0.35Mn-0.11Zr)和2197合金(Al-2.8Cu-1.5Li-0.25Mg-0.05Zn-0.3Mn-0.11Zr),低各向异性和高抗疲劳裂纹性的AF/C-489、AF/C-458、C-155合金等。第3代铝锂合金均属于Al-Cu-Li系合金,其中,美国Reynolds和Martin Maritta公司联合开发的Weldalite 049系列合金是第3代铝锂合金的典型代表,包括2076、2065、2055、2060、2050、2099、2199、2397、2198、2196和2195合金^[17]。图1所示为部分典型铝锂合金牌号及化学成分^[18]。与第2代铝锂合金相比,第3代铝锂合金具有较高的强韧性、优良的耐损伤性能、较低的各向异性和良好的可焊性等优点。国外部分铝锂合金已经实现工业化生产,在航空航天领域得到广泛应用^[19]。例如,2198-T851板材代替2524-T3和2024合金,应用于空客A350;2199板材代替传统2024和2624合金,用于制造飞机机翼和机身蒙皮;2099合金挤压件、板材和锻件代替传统7000系、6000系和2000系铝合金,用于制备动态和静态加载机身结构材料和下翼桁条;2099-T83挤压件用于制备飞机地板横梁及座位导轨;2099-T8E67挤压件应用于机翼纵梁;2099-T8挤压件取代7050-T7451被用于飞机内部结构;2195代替2219合金应用于航天运载火箭低温燃料贮箱^[20];1460合金应用于大型运载火箭低温燃料贮箱。此外,第3代铝锂合金在军工及民用领域也获得应用。军工方面,采用轻质高强以及耐蚀性良好的铝锂合金作为重型鱼雷结构材料,可显著提高鱼雷的性能。新型AA5091铝锂合金锻件被美国海军用于制备重型鱼雷燃料舱。民用方面,铝锂合金可应用于汽车和舰船等民用工业中。铝锂合金在降低密度的同时提高材料弹性模量,避免由于弹性模量低对车身刚度和车身铝材厚度的不利影响,成为汽车轻量化的新材料之一。然而,受到铝锂合金生产成本高和制备加工技术的限制,目前其在汽车行业的应用尚处于验证阶段。

随着航空航天工业的迅速发展,第3代铝锂合金已经在全球范围内得到大规模应用。目前,国内外的科研机构已经着手第4代铝锂合金的研发工作,并取得了一定成果。新一代铝锂合金的主要特征是低Li化,合金中Li含量比第3代铝锂合金中的更低;从性能上看,合金的抗疲劳性能、弹性模量

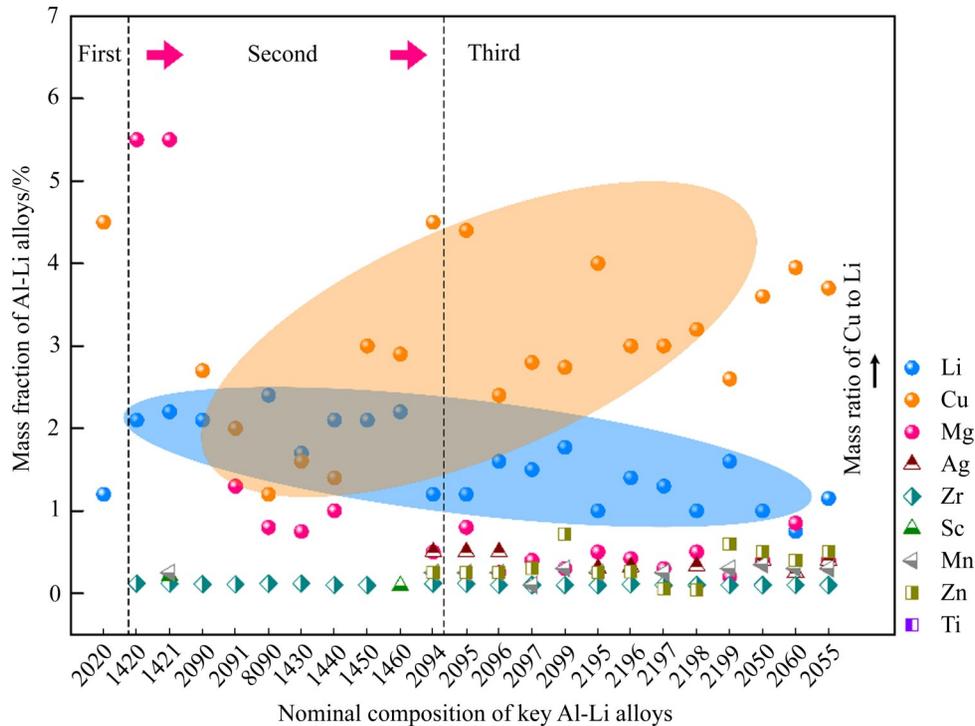


图 1 部分铝锂合金的化学成分^[18]

Fig. 1 Compositions of partial aluminum-lithium alloys^[18]

等与第 3 代合金相当, 但合金伸长率略有降低, 强度和断裂韧性有所提高^[21]。

国内对铝锂合金的研究和开发起步于 20 世纪 60 年代, 发展水平与欧美等发达国家相比还有一定差距, 而且早期以仿制为主, 例如东北轻合金有限责任公司(原东北轻合金加工厂)通过仿制 2020 合金, 成功研制出我国首款命名为 S141 的铝锂合金板材。虽然受制于诸多因素, 该合金未实现工业化生产和应用, 但是对我国铝锂合金的研究和发展具有重要意义^[22]。20 世纪 70 年代末至 80 年代初期, 由于国外技术封锁以及国内科研和工业化条件落后等原因, 我国铝锂合金的发展处于长期停滞状态。直到“七五”时期, 我国进一步加大对铝锂合金研究的资助力度, 铝锂合金被列入国家科技计划, 并取得了瞩目的成绩。20 世纪 90 年代中期, 西南铝业(集团)有限责任公司(原西南铝加工厂)以 1420 和 2195 合金为研发目标, 从国外引进先进技术与铝锂合金熔铸装备, 成功制备出大规格的铝锂合金圆锭和扁锭。至此, 中国成为继美国、俄罗斯、法国和加拿大之后能够生产铝锂合金的第五个国家, 我国铝锂合金发展进入一个崭新的阶段^[23]。目前, 我国已形成完善的铝锂合金的研发、生产和应用体系,

实现了超轻型 Al-Mg-Li 系和高强型 Al-Cu-Li 系铝锂合金大铸锭的自主生产, 并攻克了大尺寸铝锂合金板材的轧制技术^[24]。目前, 我国拥有自主知识产权的铝锂合金有 5A90、2A97 和 X2A66 合金等。5A90 合金因具有低密度、中等强度、较好的耐腐蚀性能和焊接性能等特点, 被用于制备长征 2 号火箭舱体和导弹壳体。高强韧耐损伤 2A97 合金采用 Cu、Li 合金元素近饱和设计, 比强度高达 205 N·m/kg, 与其他第 3 代铝锂合金相比优势明显, 力学性能达到 7000 系高强铝合金水平, 并在航空制造领域获得广泛应用。目前, 我国自主研发的神州系列飞行器和长征运载火箭中都有铝锂合金的应用^[25]。此外, 我国首款具有自主知识产权的大飞机 C919 的机身直段部位也采用铝锂合金。C919 的试飞成功, 加速推动了铝锂合金的国产化和规模化。

2 铝锂合金的制备方法

2.1 铝锂合金的熔炼铸造

铸造冶金法工艺简单、成本低, 是生产铝锂合金最常用的方法。在传统铸造冶金过程中, 由于金属 Li 的化学性质活泼, 熔融状态下易与常见的坩埚

材料发生反应,同时熔体会吸收空气中的 O_2 、 N_2 等气体而产生夹杂和气孔,严重降低铝锂合金的塑性,因此熔炼过程必须采取保护措施。研究表明^[26],铝锂合金在无气体或熔剂保护的条件下熔炼,铸锭中H含量比传统铝合金高出约50倍,H与碱金属在晶界处形成的氢氧化物会显著降低合金的强度和塑性。常见的铝锂合金熔炼保护方法包括熔剂保护熔炼、惰性气体保护熔炼和真空保护熔炼。熔剂保护熔炼法操作简单,一般以低熔点、低吸水性、流动性较好的LiF、KCl和LiCl的混合盐作为熔剂。国外多采用LiCl+LiF混合熔剂,保护效果好,但是LiF成本较高。我国东北轻合金有限责任公司使用50%LiF+50%KCl(质量分数)混合保护熔剂,Li的烧损率控制在每小时0.14%以下。常用的保护熔剂及使用效果如图2所示^[27]。铝锂合金熔炼过程中,熔剂覆盖在熔体表面,形成连续流动的保护层,使Li、Mg等元素挥发时受到的界面阻力增大,同时含Li的熔剂还补偿了合金中的Li含量。另外,由于合金中的氯盐润湿性好,能够进入疏松氧化膜起保护作用,而且氟盐还可以溶解Na、 Al_2O_3 杂质以及吸附在杂质中的气体,起净化熔体的作用^[28]。然而,由于熔剂保护法保护效果较差而且产生环境污染,近年来使用逐渐减少。

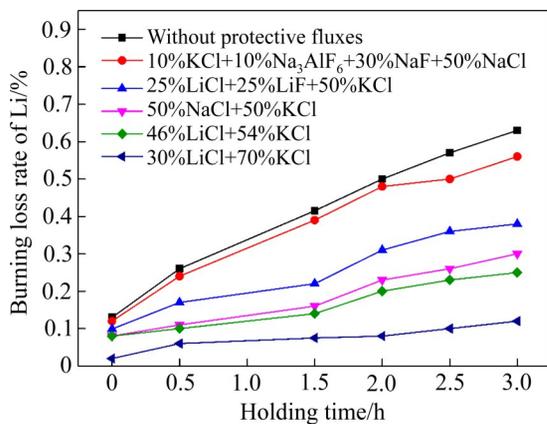


图2 铸造铝锂合金常用保护熔剂及使用效果^[27]

Fig. 2 Effect of various fluxes on Li protection during casting^[27]

惰性气体保护熔炼法,先排除熔体周围空气,再将惰性气体直接覆盖在熔体上方,从而避免合金的氧化和吸气。铝锂合金熔炼过程常用的保护气体为Ar和He,为了降低惰性气体中O、N和水的含量,熔炼前可使用分子筛净化保护气体。同时,为

了降低熔体中的H含量,除了保护气氛外,还要在熔体中通入氩气或者 C_2Cl_6 进行精炼。精炼一般分两次进行,加Li之前精炼一次,加Li之后、浇铸之前再精炼一次。RONG等^[29]研究精炼工艺对铸造Al-2Li-2Cu-0.2Zr合金夹杂物和力学性能的影响。结果表明,与未精炼的合金相比,采用 C_2Cl_6 与氩气旋转喷吹结合的两级复合精炼工艺,可使合金中气孔缺陷及夹杂的体积分数从1.47%下降到0.12%。固溶处理后合金屈服强度、抗拉强度和伸长率分别从113 MPa、179 MPa和3.9%提高至142 MPa、293 MPa和18.1%。惰性气体保护熔炼得到广泛的工业应用,但成本较高。

真空保护熔炼法是指将金属材料在小于大气压强下进行熔炼。相比熔剂和气体保护熔炼工艺,真空熔炼操作方便,经济且不污染环境,是制备铝锂合金的有效方法。在真空环境下,除了可以有效防止合金中Li、Mg等元素的氧化烧损外,熔炼过程中铝合金熔体还会产生轻微的沸腾现象,可以将游离态的H、Li、Na等元素从熔体中挥发去除,使金属得到净化。Li元素活泼的化学性质还表现在它容易与普通的陶土坩埚反应,对于常用的耐火材料,如 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Na_2O 、ZnO等,Li都是强烈的还原剂。石墨与Li反应程度低,因此采用石墨坩埚在真空条件下熔炼,可以避免坩埚与金属发生反应产生污染合金的杂质^[30]。澳大利亚Comalco铝业公司和俄罗斯全俄轻合金研究院利用真空熔炼法,使铝锂合金熔体中碱金属的含量控制在 1×10^{-6} 以内,H含量也大幅降低,合金的韧性明显提高^[31]。采用真空熔炼制备的2090铝锂合金在65℃下暴露1000 h后断裂韧性几乎不降低。然而,由于铝锂合金中Li和Mg都是饱和蒸气压较高的元素,真空条件下容易随着真空除气工艺的实施一并去除,造成合金成分偏差。卢健等^[32]采用真空保护熔炼法制备5A90铝锂合金时发现,真空度过低或精炼时间过短,将导致杂质元素不能充分析出,残余的杂质元素降低了合金的强度和断裂韧性。真空度过高或精炼时间过长,能够有效去除杂质元素,但也会造成Mg、Li等合金元素的蒸发损耗,导致化学成分失控。因此,合理的真空熔炼工艺参数是实施真空熔炼的基础。

2.2 铝锂合金的快速凝固制备

快速凝固一般是指冷却速度为 $10^3\sim 10^9$ K/s的凝固过程,通过对熔体的快速冷却,合金的非均质形核被抑制,可以获得普通凝固无法得到的显微组织。相比传统铸造冶金方法,快速凝固技术可以扩展合金元素在基体中的固溶度、细化组织、减少偏析,从而大幅提高合金强度,缩短材料生产周期,扩大合金应用范围。自1970年快速凝固技术应用于制备铝锂合金以来,快速凝固铝锂合金得到迅速发展。利用快速凝固技术制备的铝锂合金具有以下优点^[33]: 1) Li在Al中的固溶度提高,使Li含量大于3%,代替常规铝合金可使构件质量减轻10%~15%; 2) 快速凝固铝锂合金具有更为均匀、细小的显微组织,可消除铸造合金中Li元素的偏析,抑制粗大第二相的形成; 3) 快速凝固引入到铝锂合金中的弥散相比铸造合金的强化效果更为明显。目前,铝锂合金常用的快速凝固制备技术主要包括粉末冶金法和喷射沉积法。

2.2.1 粉末冶金技术

粉末冶金法(Powder metallurgy method)制备铝锂合金一般以预合金粉末为原料,经过成形烧结后得到最终产品,可以实现材料的近净成形,降低后续机加工成本,是开发新型铝锂合金的重要途径。图3所示为粉末冶金法制备铝锂合金的工艺流程。制备流程主要包括铝锂合金粉末制备,粉末筛分清除过粗和过细粉末,真空脱气处理去除粉末在制备或贮存过程中与氧或水汽接触形成的含水氧化膜,以及致密化和塑性变形等工序。

1) 铝锂合金粉末制备

高品质金属粉末是粉末冶金技术的重要基础,是决定粉末冶金构件性能的关键,而粉末的质量取决于粉末制备工艺。目前,铝锂预合金粉末的制备

方法主要包括机械合金化法、雾化法和平流铸造法。

机械合金化是将不同金属粉末按照一定配比混合均匀后,在高速球磨机中与磨球经过长时间冲击、碰撞、变形和焊合而实现原子间相互扩散,从而获得预合金粉末的一种加工技术。机械合金化法的优势在于可以制备微晶、纳米晶、过饱和固溶体或非晶态的高品质预合金粉末,为后续烧结成形奠定基础。经过球磨后的颗粒表面活化能较高,有利于减低烧结温度。美国ZHU等^[34]以纯Al和纯Li粉末为原料,利用机械合金化制备 $Al_{0.7}Li_{0.3}$ 合金,结果发现当球磨时间较短时粉末中主要包含 $\alpha(Al)$ 和AlLi相,增加球磨时间有利于晶粒的细化,球磨102 h后粉末中形成了非晶相。墨西哥MENDOZA-DUARTE等^[35]利用高速球磨制备Al-Li二元合金粉末,结果发现球磨后粉末中除了铝基体外还形成了 Al_3Li 相,晶粒明显细化。由于铝锂合金粉末化学活性较高,在球磨过程中容易被罐体和球磨介质污染,粉末颗粒表面的杂质会阻碍元素的扩散和粉末的致密化。同时,机械合金化法制备预合金粉末周期长,批量小,因此不适合高品质铝锂合金粉末的大批量生产。

雾化是一种用高速气体将高温金属液流破碎成细小液滴并迅速冷却为金属粉末颗粒的技术,其冷却速率在 $10^4\sim 10^9$ K/s之间。图4所示为雾化制粉示意图^[36]。相比机械合金化法,雾化可以充分合金化,成形速度快,制得的粉末均匀性好,球形度高。为了降低粉末中C、H、O等杂质元素含量,雾化一般在惰性气体的保护下进行。雾化是目前生产高品质球形金属粉末的主要方法,采用该工艺生产的金属粉末量占全世界金属粉末总产量的

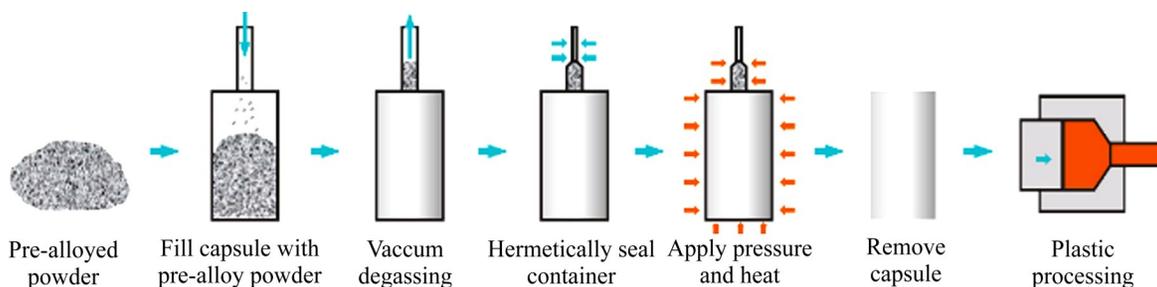


图3 粉末冶金法制备铝锂合金的工艺流程

Fig. 3 Schematic diagram of aluminum-lithium alloys prepared by powder metallurgy

30%~50%^[37]。

LIU等^[38]采用气雾化法制备了铝锂合金粉末,粉末形貌如图5所示。从图5可以看出,铝锂合金粉末基本呈球形,表面光洁,粉末表面少量卫星球是雾化过程中粉末之间相互撞击所导致,粉末表面还可以观察到明显的胞状组织。气雾化过程极快的冷却速度能够抑制AlLi平衡相的形成,Li元素在铝基体中主要以固溶形式存在。RAFFEIS等^[39]利用

电子探针显微分析研究气雾化Al-Cu-Li(AA2099)合金粉末中元素分布,结果如图6所示。由图6可以看出,Cu、Mg、Zn元素在枝晶边界存在微观偏析,而Mn元素分布不存在偏析现象。

平流铸造是快速凝固铝锂合金制粉的主要方法之一^[40],其基本原理是将液态金属通过特定形状的漏嘴,喷射到高速旋转的冷却辊轮表面,在离心力的作用下形成金属薄带。采用平流铸造法在气体保

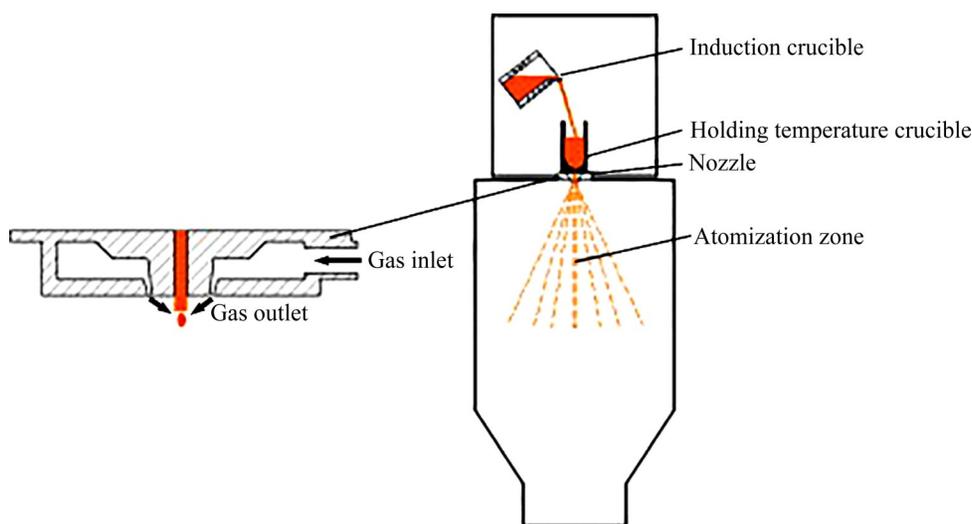


图4 气雾化制粉示意图^[36]

Fig. 4 Schematic diagram of gas atomization^[36]

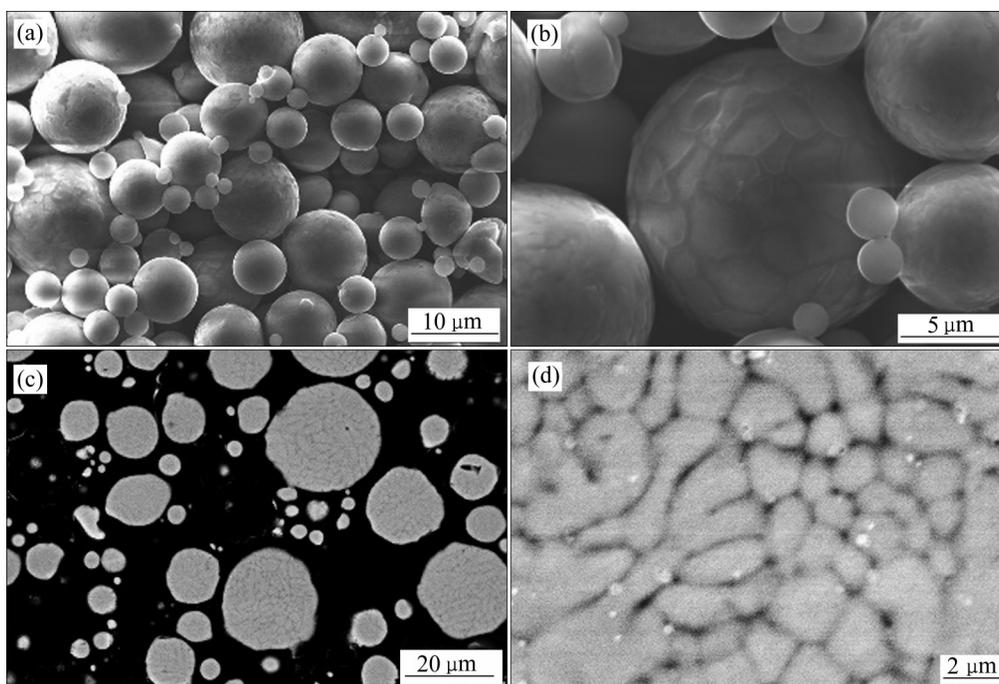


图5 气雾化铝锂合金粉末形貌^[38]

Fig. 5 Morphologies of Al-Li powder particles after gas atomization process^[38]: (a), (b) Particle morphology; (c), (d) Particle cross-section microstructure

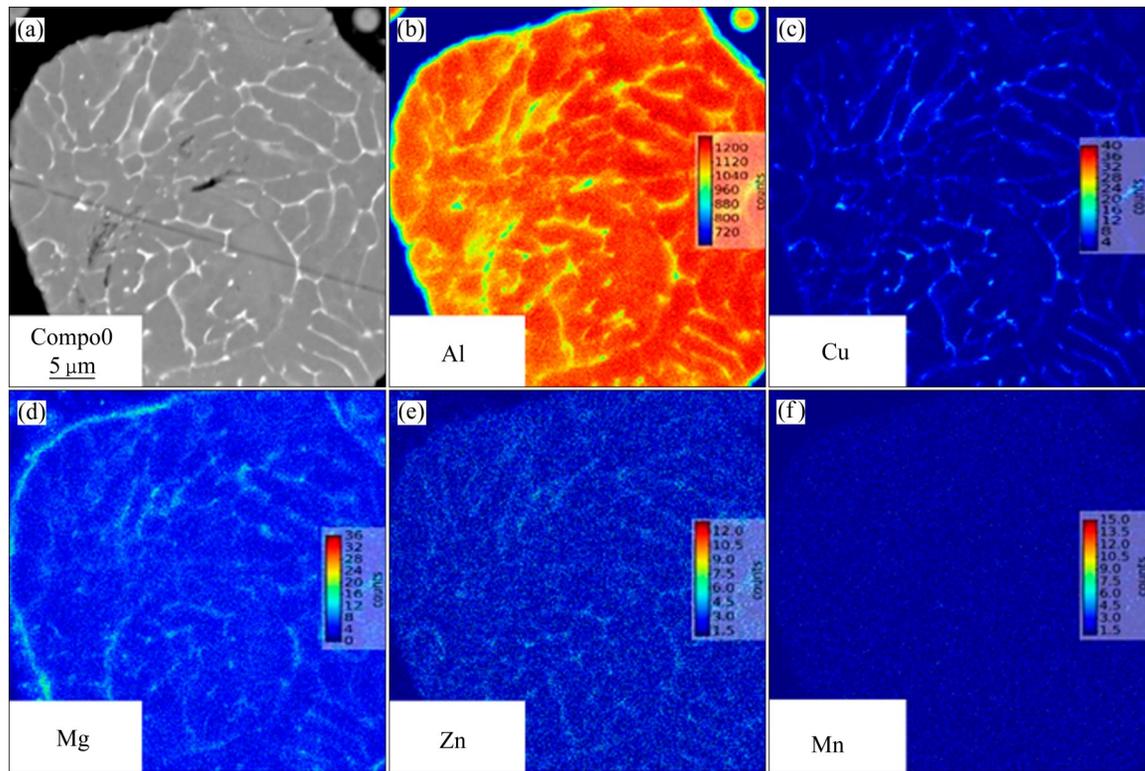


图6 气雾化Al-Cu-Li粉末截面粉末形貌及元素面扫描分布^[39]

Fig. 6 Morphology and elemental map scanning distribution of gas atomized Al-Cu-Li alloy powder^[39]: (a) Backscattered SEM image; (b) Al; (c) Cu; (d) Mg; (e) Zn; (f) Mn

护下制备铝锂合金薄带可将合金中氧含量控制在较低的范围。薄带在真空或惰性气体保护下破碎成粉末颗粒, 粉末二次边界比较少, 致密化后能够得到性能优异的铝锂合金。该工艺冷却速度极高, 制备的金属薄带具有细小的显微组织, 且无杂质相的析出, 合金性能非常稳定。由于平流铸造工艺复杂, 可变因素多, 制备不同合金的工艺参数的调整困难。此外, 平流铸造工艺获得的薄带需要专用设备粉碎后才可用于粉末冶金工艺制备材料, 加大了铝锂合金被氧化的风险, 运用平流铸造工艺生产铝锂合金粉末的实际应用程度较低。

2) 铝锂合金粉末致密化

常规的粉末冶金成形方法同样适用于粉末铝锂合金的成形制备, 不同之处在于铝锂合金粉末较活泼, 必须在真空或惰性气体保护下进行。铝锂合金粉末的致密化方法包括粉末热压、热等静压和增材制造等^[41-43]。

热压(Hot pressing)法是将粉末填充在模具腔体内, 在真空或惰性气体保护下施加机械压力进行粉末烧结, 实现粉末材料致密化的工艺。热压技术最

早应用于钨粉和碳化钨致密件的制备, 如今已广泛应用于各种硬质合金、难熔化合物以及特殊构件的生产。热压时, 由于同时施加机械压力和热量, 加速了粉末颗粒的接触和扩散等传质过程, 烧结时间变短, 从而有利于保持合金的快速凝固组织。WEBSTER^[44]利用熔炼铸造和粉末(热压)冶金方法分别制备 Al-Li-Cu-Mg-Zr 合金。结果表明, 粉末(热压)冶金铝锂合金的性能明显优于铸造合金。NAMKWON 等^[45]通过粉末热压+挤压工艺制备 Al-Li-Cu-Mg-Zr 合金, 发现铝锂合金晶粒细小, 析出相均匀分布在基体中, 且合金具有较好的超塑性性能。ZHEN 等^[46]采用粉末热压+轧制制备铝锂合金, 发现快速凝固铝锂合金峰值时效状态下强度远高于铸造合金, 其屈服强度和抗拉强度分别为 470 MPa 和 530 MPa。因此, 相对铸造冶金工艺, 采用粉末(热压)冶金方法制备的铝锂合金成分和物相分布更均匀, 组织细小, 具有更好的综合力学性能。

热等静压(Hot isostatic pressing)是一种以惰性气体为介质, 同时向制品施以高温和各向等同的压力, 使金属或陶瓷材料得以烧结和致密化的工艺。

与热压法相比,热等静压不仅可避免普通烧结工艺压力不均的问题,而且可以在相对较低的温度下获得接近全致密的材料。KUANG等^[42]采用热等静压技术制备Al-Mg-Li-Sc-Zr合金,发现当热等静压温度为400℃时,块体合金的致密度达到99.9%,其抗拉强度为352 MPa,高于铸造合金;Sc和Zr的添加能明显细化合金晶粒,经均匀化退火处理后,基体中析出大量 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 弥散相,产生强烈的抑制晶粒长大和再结晶作用,从而有效提高合金强度。

增材制造(Additive manufacturing)是一种通过三维数据模型并采用材料逐层累加的方法实现零件成形的新技术。根据制备工艺的不同,增材制造技术可以分为激光选区熔化(Selective laser melting, SLM)、激光熔覆沉积(Laser cladding deposition, LCD)和电子束选区熔化(Electron beam melting, EBM)等^[47]。相比于传统粉末冶金方法,增材制造技术能在极短的时间内完成粉末的熔化和凝固,具有零件开发周期短、精度高等特点,可用于金属零件的直接成形。但是,由于铝合金密度较低、粉末流动性差、容易氧化以及对激光反射率高等特点,增材制造成形铝合金的难度较大。目前,增材制造铝合金主要包括Al-Si、Al-Mg、Al-Cu和Al-Zn-Mg等合金体系。铝锂合金中由于Li具有较高的化学活性和较低的熔化温度,在熔化过程中容易挥发;成形过程中较高的冷却速率和不稳定的热循环也会导致难以预测的微观结构的形成,从而影响材料的性能。例如,CUI等^[48]研究激光焊接对铝锂合金组织和性能的影响时发现,在快速凝固过程中形成了 Al_3Li 相。因此,如何精确控制铝锂合金成分和构件质量是增材制造铝锂合金迫切需要解决的问题。目前,国内针对增材制造成形铝锂合金的研究仅有中南大学、华中科技大学、北京航空航天大学 and 哈尔滨工业大学等进行了相关报道。

中南大学XU等^[43]利用选区激光熔化技术制备Li和Zr改性后的Al-Cu-Mg合金时发现,成形态合金中存在明显的孔隙和裂纹缺陷,当激光能量密度为 100 J/mm^3 时,合金致密度仅为97.8%。不规则的裂纹和孔隙聚集在熔池边界处,球形微孔随机分布在合金基体中。沿晶界生长的裂纹与成形方向平行,裂纹与晶界间具有较高的角度,这是由前沿液膜中局部应力集中所导致。另外,合金硬度随着激

光能量的增加而提高。

QI等^[49]采用选区激光熔化技术制备高强2195铝锂合金,并研究热处理对合金显微组织和力学性能的影响。结果表明,成形态合金由粗大的柱状晶组成,基体中位错密度较高,并存在大量的析出相。热处理后合金中 T_1 相为主要强化相,其性能与商用2195-T8板材相当,抗拉强度和伸长率分别为587 MPa和6.9%。张新瑞^[50]通过大量实验确定选区激光熔化2195铝锂合金的最佳工艺参数,并研究Zr以及Zr+Er复合添加对合金热裂纹的影响。结果表明,当扫描间距为 $90 \mu\text{m}$,功率为80~160 W时,合金致密度达到99.97%,合金元素的添加能有效抑制裂纹缺陷的形成。

JIAO等^[51]采用激光熔覆沉积技术研究铝锂合金的显微组织、拉伸性能和显微硬度。结果表明,成形态合金内部具有不同的显微组织结构,合金顶部为枝晶结构,枝晶晶粒内部存在少量不规则的析出相。由于激光沉积过程热循环的存在,合金底部不规则的条纹相数量减少,同时基体中析出大量针状 T_B 相。

3) 粉末冶金铝锂合金的缺陷及消除措施

粉末冶金消除了铸造铝锂合金中元素的宏观偏析,细化了合金组织,使合金构件的性能得到提高,但同时不可避免地引入了一些缺陷。粉末冶金铝锂合金中常见的缺陷有原始粉末颗粒边界、热诱导孔隙、非金属夹杂以及热裂纹等。

原始颗粒边界(Prior particle boundary, PPB)。粉末颗粒间界面结合强度与原始粉末的表面状态有关。铝锂合金中由于Li元素的存在,雾化制粉过程中即使有惰性气体保护,粉末表面也能形成一层氧化膜,成品中氧化物颗粒和原始粉末颗粒边界的存在降低了合金的塑性。热真空除气可以改变粉末表面状态。常规铝合金粉末表面氧化层中的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 除气后转变为易破碎的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$,从而可以减小对粉末界面强度的影响。铝锂合金粉末表面氧化层中除 Al_2O_3 外还有大量的 Li_2O ,除气后氧化层中 Al_2O_3 数量明显减少,而 Li_2O 数量和氧化层的总厚度增加^[52]。氧化层组成和厚度的变化与Li在除气加热过程中迁移到粉末表面,与 Al_2O_3 发生反应后形成 Li_2O 有关。原始颗粒边界在铝合金中属于弱连接,不仅阻碍粉末颗粒之间的扩散与连接,而且会促使裂纹形成和继续扩展并最终发生断裂。因此,必须

通过后续的热变形加工来消除粉末颗粒边界。挤压后可将连续的粉末颗粒边界破碎, 形成沿变形方向分布的氧化物颗粒, 并完成动态再结晶。改变热加工温度和变形速率可促进构件发生动态再结晶, 降低粉末颗粒边界产生的不利影响。

热诱导孔隙(Thermal induction pore, TIP)是粉末冶金材料中残余气体在高温下体积膨胀而产生的孔隙。粉末成形后若无后续的变形加工, 孔隙将滞留在合金中, 严重影响材料的性能。热等静压过程中包套漏气或粉末脱气不完全, 以及空心粉的存在都可能导致热诱导孔隙的形成。因此, 选择合适的包套材料、调整成形工艺可有效避免热诱导孔隙的形成。

非金属夹杂(Non-metallic inclusions, NMI)是粉末合金夹杂的主要组成, 也是影响合金构件使用寿命的重要因素^[53]。夹杂物包括氧化物陶瓷颗粒和有机物, 主要来源于原材料和粉末制备及后处理过程。提高原材料纯净度, 采用耐高温、抗冲刷的坩埚和喷嘴, 可降低合金中夹杂物的含量。另外, 挤压和锻造等变形加工可以破碎夹杂物, 改变其大小和分布。当夹杂物尺寸小于 100 μm 时, 对合金低周疲劳性能影响较小。

增材制造合金受液态金属高温梯度及表面张力等因素的影响, 凝固后材料表面质量较差, 而且材料内易出现热裂纹和孔隙等冶金缺陷。热等静压可消除成形过程中产生的微裂纹, 微合金化可以改善粉末流动性和聚集状态, 进而消除合金中的微裂纹。

2.2.2 喷射沉积技术

喷射沉积又称为雾化沉积、喷射成形或喷射铸造, 其原理是利用高压惰性气体将液态金属雾化形成不同尺寸的液滴, 液滴在高压气流的作用下直接沉积在水冷金属基体上形成成品或半成品, 其基本系统构成如图 7 所示^[54]。雾化过程中的高热量排出使得沉积坯料表现出快速凝固的组织特征。喷射沉积实质上是一种介于粉末冶金和铸造工艺之间的制备大块金属材料的新颖技术, 它同时包含了铸造和粉末冶金法的优点。与粉末冶金技术相比, 喷射沉积省去了粉末冶金加工过程中的粉末制备和后处理等过程, 简化雾化到最终成形之间的工序, 缩短生产周期, 降低生产成本。此外, 整个喷射沉积过程均在惰性气体保护下进行, 合金氧化程度低, 从而避

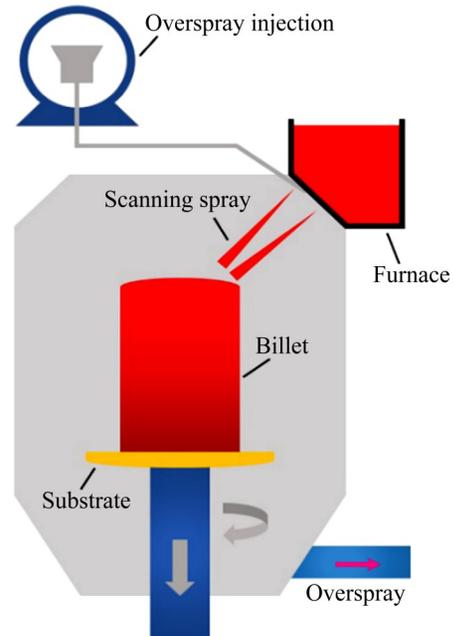


图 7 喷射沉积系统构成图^[54]

Fig.7 Equipment illustration of spray forming process^[54]

免了粉末氧化对合金性能的影响。因此, 近年来喷射沉积铝锂合金的研究受到关注。与普通铸造铝锂合金相比, 喷射沉积铝锂合金的强度和韧性以及稳定性方面明显提高。

LAVERNIA 等^[55]研究喷射沉积 2024+1%Li 合金的显微组织和力学性能时发现, 由于快速凝固细化合金组织, 同时喷射沉积降低了材料的氧含量, 从而可以避免压力加工后材料中的氧化物聚集, 合金裂纹扩展速率远低于铸造和粉末冶金材料的水平, 合金塑性和韧性大幅提高。在 T6 状态下, 合金的屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 513 MPa、363 MPa 和 16.4%。WANG 等^[56]对比铸造和喷射沉积 2195 铝锂合金均匀化处理后的显微组织时发现, 喷射沉积铝锂合金晶界析出相尺寸明显小于铸造合金, 均匀化处理所需时间较短。

喷射沉积技术虽然有很多优势, 如细化显微组织、提高合金元素在铝中的固溶度以及获得无宏观偏析的组织^[57], 但是, 它的缺陷也同样明显, 主要包括孔隙和微观偏析。为了提高铝锂合金的力学性能和致密度, 喷射沉积合金通常需要进行后续变形加工和热处理等。WANG 等^[58]研究挤压和热处理工艺对喷射沉积 2195 铝锂合金显微组织和力学性能的影响。结果表明, 喷射沉积合金具有细小的等轴晶粒和较低的元素微观偏析, 三叉晶界处存在少量

孔隙。挤压后孔隙消失,合金呈现出典型的纤维状组织和少量的再结晶晶粒;热处理后基体中存在大量的 T_1 和 Al_3Li 相。在T8状态下,合金的抗拉强度和伸长率分别为632 MPa和10%。

3 铝锂合金的强韧化

3.1 强韧化机理

铝锂合金的强化作用主要来源于固溶强化和沉淀强化,本质上都是通过改变材料内部组织结构来阻碍位错的运动,从而提高材料强度。位错与时效过程中形成的弥散粒子的相互作用包括切过和绕过两种方式。当位错与铝锂合金中尺寸较小的共格或半共格析出相相遇时,如GP区、 δ' 相、 θ' 相和 T_1 相等,位错切过第二相粒子,使得基体与粒子间界面能增加,引起剧烈的强化效应,显著提高合金强度;当位错遇到尺寸较大的第二相或 Al_3Sc 、 Al_3Zr 等硬质相时,位错绕过第二相粒子,并在第二相粒子周围留下位错环。当位错不断绕过粒子时,会在粒子周围聚集大量的位错环,增加了第二相粒子的有效尺寸,使得后续位错通过时更加困难,加工硬化率显著提高,这种强化作用与析出相粒子间距成反比,颗粒间距越大则强化效果越弱。

材料强度与塑性在一定程度上是相互矛盾的,强度提高往往伴随着合金塑性下降。铝锂合金塑性低的原因可归纳为以下几点:1)有序 Al_3Li 相与基体完全共格,易被位错切割,形成共面滑移并在晶界处产生局部应力集中,导致晶界裂纹的萌生;2) $AlLi$ 、 Al_2MgLi 等平衡相的析出导致合金中 Al_3Li 相体积分数减小,合金强度下降,并且平衡相的形成破坏了晶界的连续性,降低合金塑性;3)Na、K、Ca等碱金属易在晶界偏聚,形成钠脆;4)Li元素化学性质活泼,使铝锂合金相比常规铝合金H含量更高,易导致氢脆。此外,晶界附近的无沉降析出带(Precipitate free zones, PFZ)的形成导致微孔在晶界析出相附近形核,容易沿PFZ扩展而形成裂纹,并最终导致晶间断裂。

3.2 强韧化方法

铝锂合金的强韧性与合金的组织结构有着密切的关系。针对铝锂合金的组织特征和强韧化机制,可通过优化合金成分、变形加工以及热处理工艺的

方式来改善铝锂合金的强韧性。

3.2.1 铝锂合金成分优化

铝锂合金属于可热处理强化的铝合金。时效处理后,合金基体中可获得大量纳米级析出相,析出相的种类、形貌、体积分数以及分布情况强烈依赖于合金成分。合金化是调控铝锂合金显微组织,改善合金性能最有效的方法。根据主合金元素的不同,铝锂合金可以分为Al-Mg-Li系,如1420和1421;Al-Cu-Li系,如1460、2195、2198;Al-Cu-Li-Mg系,如2090、2091、8090^[59]。为了获得更好的综合性能,在这些合金体系中还会加入能够形成弥散强化相的Zr、Sc、Mn和Ti等元素,通过细小弥散分布的难变形质点来抑制合金发生共面滑移的趋势和稳定快速凝固过程中形成的细小晶粒组织。合金元素的多样性,导致铝锂合金中存在多种类型的纳米级析出相。因此,深入了解铝锂合金析出相的微观结构和建立完整的时效析出序列,对铝锂合金成分设计和热处理工艺制定至关重要。

1) Al-Mg-Li

Al-Mg-Li系铝锂合金中,Mg是固溶强化元素,在Al中的固溶度为17.4%。Al-Mg-Li合金体系中,由于Li原子和Al原子的尺寸差较小,其固溶强化效果不明显,合金强度主要源于 Al_3Li 相的形成^[60]。 Al_3Li 相通常存在于欠时效和峰时效状态合金中,而过时效处理后,受合金中Mg和Li元素含量的影响,部分 Al_3Li 相转变为AlLi相或 Al_2MgLi 相^[61-62]。例如,当Mg含量 $<3.5\%$,Li含量 $<1.9\%$ 时,过时效析出相为AlLi相;当Mg含量 $>5\%$,Li含量 $<1.7\%$ 时,过时效析出相为 Al_2MgLi 相;而当Mg含量 $>5\%$,Li含量 $>1.7\%$ 时,过时效合金中同时存在AlLi和 Al_2MgLi 相。

Al_3Li 相为有序 $L1_2$ 型超点阵结构,其中Li原子占据FCC结构的顶角位置,Al原子占据面心位置,与基体的取向关系为 $(100)_{Al_3Li} // (100)_{Al}$, $[100]_{Al_3Li} // [100]_{Al}$,并且错配度很小^[63]。铝锂合金中 Al_3Li 相以调幅分解的形式在基体中析出,在形成初期与基体没有明显的相界面,时效后期析出相与基体过渡区消失,并通过溶质原子扩散长成球形颗粒^[64]。由于 Al_3Li 相与基体有序共格,合金塑性变形时,容易被位错成对切过,发生共面滑移,造成晶界处的应力集中,使得铝锂合金发生脆性断裂,材料强度

和塑性下降。过时效状态下, 依据合金成分变化, Al_3Li 相转变成棒状 Al_2MgLi 或片状 AlLi 平衡相。平衡相的析出会消耗大量的 Al_3Li 相, 并在晶界处形成 PFZ。GAULT 等^[65]利用三维原子探针层析技术研究 Al-Mg-Li 系铝锂合金的时效析出行为, 结果如图 8 所示。从图 8 可以发现, 合金中由于 Mg 元素的加入, 不但能够降低 Li 在 Al 中的固溶度, 而且 Mg 原子还能替代 Li 原子的占位, 从而促进 Al_3Li 相的析出。

2) Al-Cu-Li

第 3 代铝锂合金均属于 Al-Cu-Li 体系, 合金中除了 Al_3Li 相外, 还会析出 θ' 相和 T_1 相。Cu 和 Li 质量比的变化会改变合金中强化相的体积分数和分布, 时效析出相的析出顺序和类型在一定程度上也取决于 Cu 与 Li 质量比的数值^[66]。

θ' 相成分为 Al_2Cu , 是一种正方结构的半共格亚稳相, 晶格常数为 $a=0.404 \text{ nm}$ 和 $c=0.58 \text{ nm}$, 与基体取向关系为 $(100)_{\theta'}/(100)_{\text{Al}}$, $[100]_{\theta'}/[001]_{\text{Al}}$ ^[67]。半共格界面可以阻碍位错运动, 使 θ' 相成为铝锂合金的有效强化相。当 Cu 含量较高时, 铝锂合金 θ' 强化相的数量增多, 从而提高合金强度^[68]。

BOURGEOIS 等^[69]研究发现, Al-Cu 合金中由过饱和固溶体到 θ' 相的形成需要经历 $\theta'' \rightarrow \theta'_i \rightarrow \theta'$ 的转变过程, 转变相的界面结构如图 9 所示。在 θ''/θ'_i 界面处, θ'' 借助刃型位错沿垂直半共格界面方向, 朝两端滑移一个柏氏矢量, 转变为 θ'_i 。靠近 $\theta''/\alpha\text{-Cu}$ 界面一侧, Cu 原子向内扩散形成 θ'_i 元胞结构, 从而实现 $\theta'' \rightarrow \theta'_i$ 的转变。同时, θ'_i 相中间隙原子的继续扩散最终实现 $\theta'_i \rightarrow \theta'$ 的转变。

T_1 相是铝锂合金中最有效的强化相, 化学成分为 Al_2CuLi , 是一种六方结构的平衡相, 晶格常数为 $a=0.4965 \text{ nm}$ 和 $c=0.9345 \text{ nm}$, 与基体半共格, 取向关系为 $(0001)_{T_1}/(111)_{\text{Al}}$, $[1010]_{T_1}/[110]_{\text{Al}}$ ^[70]。图 10 所示为 T_1 相的透射显微组织。从图 10 可以发现, T_1 相为圆盘状, 直径在几十至上百纳米之间, 厚度约为 2 nm ^[71-72]。根据铝锂合金中 Cu 和 Li 的比值不同, 时效过程中 T_1 相的非均匀形核机制有一定的区别。在高 Cu 与 Li 质量比的合金中, T_1 相在 GP 区形核; 在低 Cu 与 Li 质量比的合金中, T_1 相在由 $a/2\langle 110 \rangle$ 位错分解成的 $a/6\langle 112 \rangle$ 肖克莱部分位错层错位置处不均匀形核^[73]。此外, 合金元素的添加可以有效调控 T_1 相的析出行为^[74-75]。比如, Mg 元素

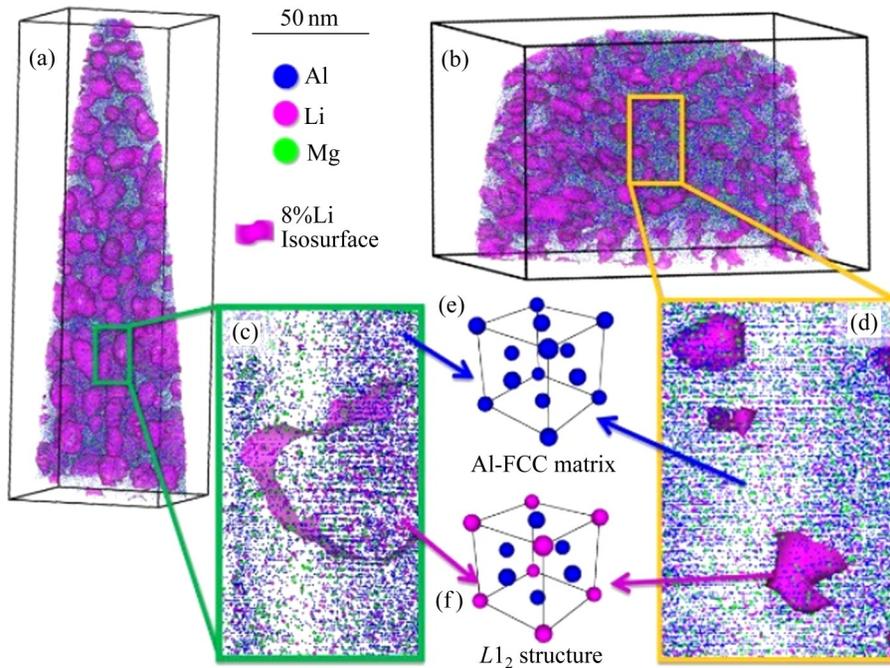


图 8 Al-Mg-Li 合金时效后三维原子探针重建分析^[65]

Fig. 8 Three-dimensional reconstruction from atom probe tomography analyses of Al-Mg-Li alloy after various aging treatment conditions^[65]: (a) 8 h at 150 °C; (b) 24 h at 120 °C; (c) Close-up showing (022) atomic planes imaged in date set displayed in Fig. 8(a); (d) Close-up showing (002) atomic planes imaged in date set displayed in Fig. 8(b); (e)–(f) Model view of Al-FCC matrix and of $L1_2$ structure

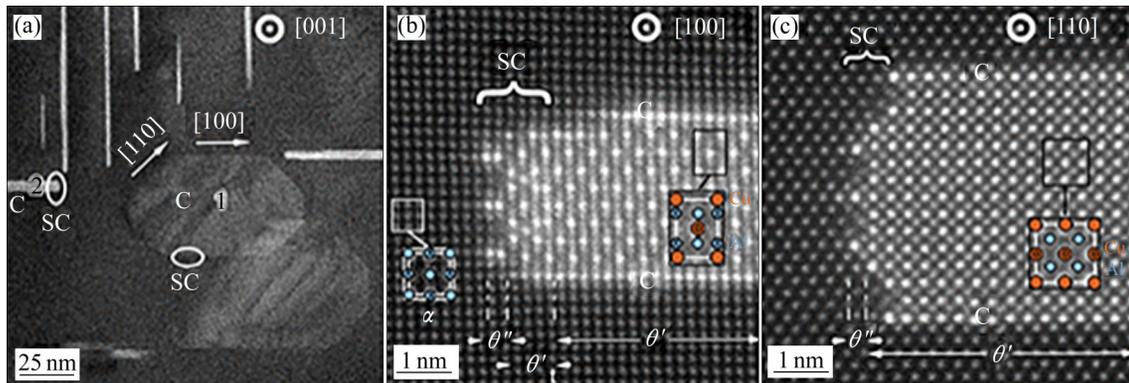


图9 Al-Cu合金中 θ' 相透射电子显微表征^[69]

Fig. 9 TEM characterization of θ' precipitates in Al-Cu alloy^[69]: (a) HAADF-STEM image showing three orientation of θ' precipitates and their faceting along $\langle 100 \rangle$ and $\langle 110 \rangle$ directions; (b) $\{100\}$ interface; (c) $\{110\}$ interface

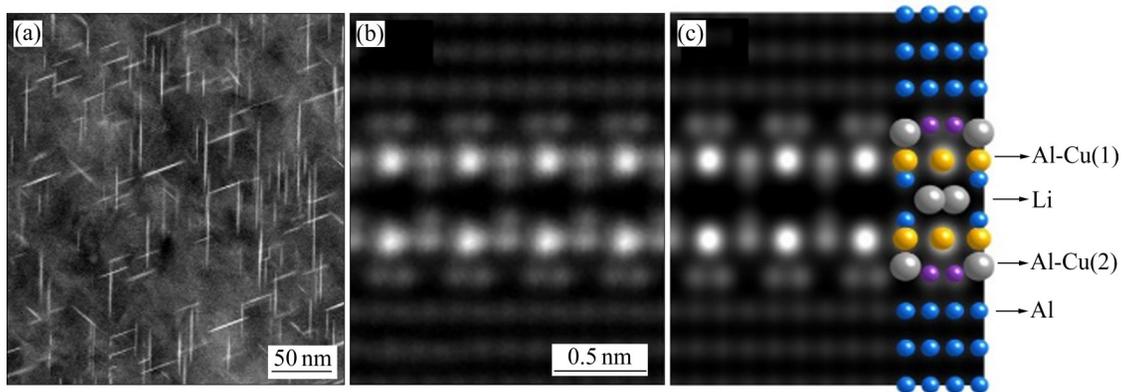


图10 Al-Cu-Li系铝锂合金中 T_1 相的TEM像^[71-72]

Fig. 10 TEM images of T_1 precipitates in Al-Cu-Li alloy^[71-72]: (a) STEM HAADF image of T_1 precipitate; (b) Periodically-averaged image at $\langle 112 \rangle_\alpha$ orientation; (c) Simulated image with atomic structure overlaid

可降低材料的层错能，促进 T_1 相在基体中的均匀分布；Ag和Mg元素同时添加时，基体中形成大量“Ag-Mg”原子团簇，促进Li和Cu原子向“Ag-Mg”原子团簇的扩散和聚集，有利于 T_1 相的形核和长大；Ce元素可以细化 T_1 相^[76]；在含Zr元素的合金中， T_1 相还能在 δ' 相与基体的界面处形核。在Al-Cu-Li合金时效初期， T_1 相通过消耗 Al_3Li 相的方式长大；当合金处于过时效状态时， T_1 相通过消耗基体中AlLi相和 θ' 相的方式长大^[77]。尽管 T_1 相的长大会消耗合金中 δ' 相，但是由于合金塑性变形过程中 T_1 相难以被位错切过，因此， T_1 相的形成有利于提高材料力学性能。人工时效前的冷变形，可增加合金中位错密度，大量的位错为 T_1 相提供非均匀形核场所，从而导致 T_1 相的析出密度显著增加。

3) Al-Cu-Li-Mg

在铝锂合金中添加Cu、Mg和Zr等多种合金元

素可在基体形成 Al_3Li 、 θ' 、 T_1 和 S 等强化相，能有效地改善铝锂合金性能。Cu、Mg元素不仅有利于 T_1 相的形核，而且能促进针状 S 相的析出。 S 相的化学成分为 Al_2CuMg ，是一种斜方结构的平衡相，晶格常数为 $a=0.401$ nm， $b=0.925$ nm和 $c=0.715$ nm，与基体保持半共格关系^[78]。人工时效过程中 S 相的析出序列为： $SSS \rightarrow GPB$ 区/ $Cu-Mg$ 原子团簇 $\rightarrow S''$ ($GPB2$ 区) $\rightarrow S' \rightarrow S(Al_2CuMg)$ ^[79]。 GPB 区又称为 $Cu-Mg$ 原子团簇，与基体保持共格关系，在时效初期通过Cu和Mg原子扩散偏聚形成。Al-Cu-Li-Mg合金在时效过程中存在两个强化阶段，第1阶段源于 $Cu-Mg$ 原子团簇、位错与溶质原子之间的相互作用；第2阶段由 S' 相和 S 相共同主导。细小均匀分布的 S 相不但可以提高合金强度，还能促进合金的均匀变形，从而改善合金塑性。此外， S 相能改善铝锂合金的晶界形貌，窄化甚至消除晶界处

PFZ。 S 相长大速度较慢,可在位错处均匀析出,因此,人工时效的冷加工有利于 S 相的析出和均匀分布。

4) 微量合金元素的作用

微量合金元素的添加能改变第二相的时效析出行为,进而优化合金组织结构^[80]。铝锂合金中常用的微量添加元素包括Zr、Mn和Sc等。

Zr 元素。Zr作为微量元素添加到铝锂合金中,除了部分固溶在基体中外,合金凝固过程中形成的大于临界尺寸的 Al_3Zr 初生相可以为晶粒提供形核场所,细化合金组织,从而改善合金性能。均匀化和时效处理过程中,可以在合金基体中析出 $L1_2$ 型 β' (Al_3Zr)粒子。细小且弥散分布的 β' 粒子对亚晶界和位错具有很强的钉扎作用,能够有效抑制热加工过程的再结晶行为。 Al_3Zr 相的弥散分布还能改善合金中 Al_3Li 相的析出特征,使 Al_3Li 相分布更加均匀。同时,由于 Al_3Li 相和 Al_3Zr 相都具有 $L1_2$ 有序结构,时效过程中 Al_3Li 相可以包覆在 Al_3Zr 相周围,形成中心硬度高的复合相,有效抑制局部平面滑移,改善合金塑性。同时,由于 Al_3Zr 相在高温状态下仍然具有较好的稳定性,使合金保持细晶状态,从而提高材料的塑韧性。然而,铝锂合金中Zr元素的含量过高时会形成大尺寸的析出相,对合金性能产生不利影响。因此,铝锂合金中Zr添加量一般为0.1%~0.2%。

Mn 元素。Mn在Al中的最大平衡固溶度为1.82%,对合金的时效过程一般没有影响。Mn元素添加到铝锂合金中可形成 $Al_{20}CuMn$ 或 Al_6Mn 弥散粒子,固溶处理时这些弥散粒子不会溶解,能够抑制再结晶和晶粒长大,分散共面滑移,使滑移更加均匀,从而提高合金塑性、降低各向异性。当Mn含量过高时,基体中形成大量 Al_6Mn 脆性相围绕在晶界PFZ附近,对合金的塑性不利。铝合金添加Mn元素的另一个原因在于原材料中不可避免会含有杂质Fe,导致在晶界处形成富Fe相,损害合金力学性能,而Mn作为一种有效的除铁剂,能有效改善晶界富Fe相的形貌,降低其对合金力学性能的危害。

Sc 元素。Sc的原子序数为21,位于元素周期表中第III副族,具有过渡元素和稀土元素的双重特征。俄罗斯研究人员对比了17种稀土元素对铝锂合金性能的影响,发现Sc是铝锂合金中最有效的

变质剂。Sc在铝锂合金中的作用与Zr类似,可以起到细化合金晶粒、提高合金强度、抑制再结晶以及改变强化相尺寸、形貌和分布状况的效果。铝锂合金中添加少量Sc除了能够形成 $L1_2$ 型 Al_3Sc 粒子外,还能与Li形成化合物,弥散分布在晶内,并可促进亚结构的形成。在铝锂合金中,同时加入Zr、Sc还能形成 $Al_3(Sc, Zr)$ 弥散质点,起弥散强化和细化晶粒作用。相比于 Al_3Zr 和 Al_3Sc 粒子, $Al_3(Sc, Zr)$ 弥散相对晶界和位错具有更强的钉扎作用,能抑制热变形加工和热处理过程中的再结晶行为并形成强的变形组织,有利于滑移穿过晶界^[81-82]。ZHANG等^[83]研究Sc元素对Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.2Zr合金显微组织和力学性能的影响时发现,Sc和Zr的复合添加能在合金中形成具有核壳结构的 $Al_3(Li, Sc, Zr)$ 复合相,合金力学性能明显改善。

Be、Ce和La等元素。加入Be可以抑制Na在晶界处的偏析;Ce、La、Y等稀土元素的添加能改善铝锂合金的强度韧性和晶粒尺寸,减轻杂质元素的危害,从而提高合金的强韧性^[84]。

3.2.2 热变形及热处理

1) 热塑性变形

除了极少数铸造件和烧结件外,几乎所有的金属制品都要经过热加工变形。塑性变形一方面是为了得到具有一定形状的合金构件,对于快速凝固铝锂合金,更为重要的是由于铝锂合金粉末中氧化膜的存在,通过热压烧结难以获得全致密的合金,而热变形加工能够有效消除合金构件中的残留孔隙,从而提高合金的强度和塑性。铝锂合金常用的热加工方法包括热轧、热锻和热挤压等。不同加工方式制备的铝锂合金具有不同的组织结构特征,挤压后合金中等轴晶粒沿变形方向被拉长成竹节状组织。轧制变形后,等轴晶粒被拉长为饼状结构。合金组织结构还取决于热变形工艺参数,变形温度越高,变形程度越大,晶粒沿变形方向伸长越多。为了确定合适的热变形工艺参数,通常采用等温压缩试验研究铝锂合金的热变形特点,揭示铝锂合金的变形机理,从而建立合适的热加工窗口。WANG等^[85]研究喷射沉积2195铝锂合金的热变形行为及组织演变规律,结果如图11所示。在变形温度为500℃和550℃,应变速率为0.1 s⁻¹和1 s⁻¹条件下进行热压缩实验时,由于合金中不存在 Al_2CuLi 相,喷射

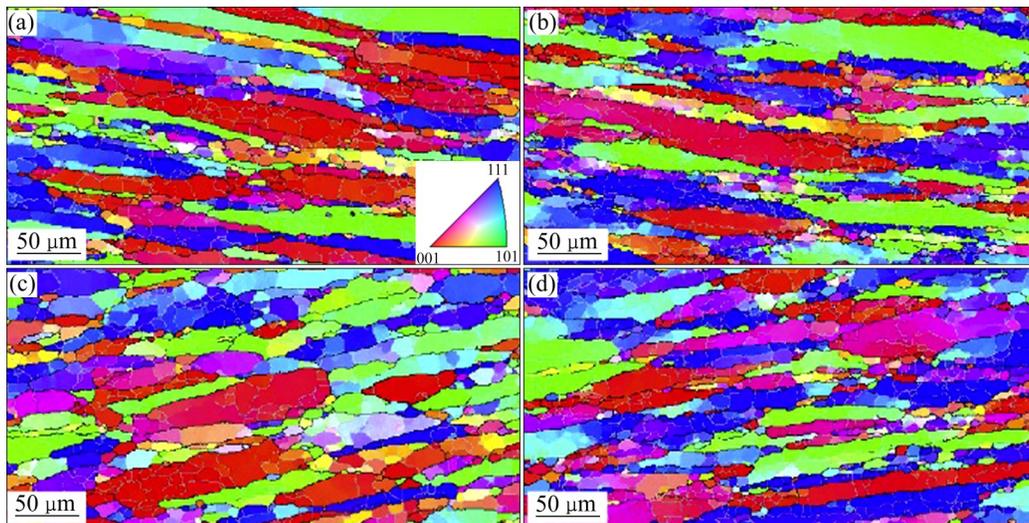


图11 喷射沉积2195铝锂合金在不同温度和应变速率下的显微组织^[85]

Fig. 11 Microstructures of spray deposited 2195 Al-Li alloy under different temperature and strain rate^[85]: (a) 500 °C, 0.1 s⁻¹; (b) 500 °C, 1 s⁻¹; (c) 550 °C, 0.1 s⁻¹; (d) 550 °C, 1 s⁻¹

沉积2195铝锂合金的软化机制为动态回复和动态再结晶。

此外,根据基于峰值应力应变导出的Arrhenius方程如下:

$$\sigma_p = 51.17 \ln \left\{ \left(\frac{z}{6.2238 \times 10^{16}} \right)^{0.2078} + \left[\left(\frac{z}{6.2238 \times 10^{16}} \right)^{0.4155} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (1)$$

计算发现,喷射沉积2195铝锂合金的激活能为253 kJ/mol,远高于成分相同或相似的铸造铝锂合金。例如,铸造2195铝锂合金的激活能为227 kJ/mol,2099铝锂合金的激活能为203 kJ/mol,2060铝锂合金的激活能为205 kJ/mol,Al-3.7Cu-1.7Li-0.8Zn-0.55Mg-0.3Mn-0.14Zr合金的激活能为236 kJ/mol^[86-89]。变形激活能一般与合金元素组成、含量、固溶度以及热变形过程中的动态析出行为有关,这说明喷射沉积技术可以提高铝锂合金的激活能。变形激活能是反映合金变形难易程度的重要参量,变形激活能越大,材料越难发生塑性变形^[90]。当铝合金变形激活能接近纯铝的自扩散激活能时,其软化机制以动态回复为主;当变形激活能高于自扩散激活能时,其软化机制以动态再结晶为主。

2) 热处理

热处理是改善铝锂合金性能的有效手段,常见

的热处理工艺包括固溶处理和时效处理。

① 固溶处理

新型铝锂合金成分设计时,为了获得优良的综合性能或提高某些特殊性能,通常会加入较多的Cu、Mg、Zr、Zn和Ag等合金元素。快速凝固技术虽然能避免合金发生宏观偏析现象,但是在晶界处仍然会形成粗大的第二相颗粒,降低合金的塑性和断裂韧性。王欣等^[91]研究热处理工艺对增材制造铝锂合金组织和性能的影响时发现,成形态合金具有较低的强度和塑性。这是由于铝锂合金导热系数大,增材制造过程中产生的热循环促进针状相的析出和长大,导致材料性能明显下降。固溶处理可使合金制备过程中残留的第二相重新溶解并形成过饱和固溶体,为后续时效强化相的析出提供形核驱动力。固溶后合金的组织 and 性能与固溶工艺密切相关。固溶温度过高或保温时间过长时,合金会发生再结晶和晶粒长大现象,对材料性能不利。因此,铝锂合金固溶温度一般略低于固相线温度。

② 时效处理

铝锂合金具有明显的时效硬化特性,作为可时效强化合金,合适的时效处理可提高合金强度和韧性。与铸造铝锂合金不同,快速凝固铝锂合金时效后达到峰值强度所需时间和峰值强度维持时间,除了与时效温度、合金成分、变形条件有关外,还取决于亚稳态组织的保持^[92]。铝锂合金时效处理后可

在基体中析出大量细小弥散的纳米沉淀相, 而沉淀相的类型、尺寸、数量和分布情况主要受热处理制度及合金成分的控制, 并显著影响合金力学性能。根据材料性能要求、合金成分和制备工艺的不同, 铝锂合金可采用不同的时效工艺, 主要包括单级时效、双级时效和变形时效。

单级时效又称等温时效, 典型的单级时效温度为 120~190 °C, 保温 20~50 h 后可以达到峰值状态。合金中强化相的析出顺序、颗粒尺寸和粗化速度在很大程度上受时效温度和时间的影响。JIANG 等^[93]研究时效处理对 Al-Cu-Li 合金组织和性能的影响, 结果如图 12 所示。从图 12 可以看出, 经 160 °C、26 h 时效处理后, 合金中存在少量的 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}_3\text{Li}$ 复合相和 θ' 相; 时效时间为 104 h 时, 与时效 26 h 试样相比, 合金中 θ' 相尺寸明显增大, $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}_3\text{Li}$ 复合相粒径减小; 当时效时间进一步延长至 159 h 时, 合金中还析出具有方形结构的第二相。

为了进一步提高合金性能, 在单级时效的基

础上, 开发了双级甚至多级时效制度。其原理是先利用低温时效使析出相在基体内均匀形核, 然后通过高温短时间保温, 调节和稳定合金中析出相的尺寸和体积分数, 这样既可以抑制晶界有害相的形成, 还能够提高材料强度、耐蚀性和断裂韧性。特别地, 当铝锂合金中含 Zr 和 Sc 元素时, 双级时效提高合金的塑性和韧性与合金中出现较多的 $\text{Al}_3(\text{Li}, \text{Sc}, \text{Zr})$ 复合相有关, 双级时效有利于 $\text{Al}_3(\text{Li}, \text{Sc}, \text{Zr})$ 复合相的形成和均匀分布, 从而达到改善铝锂合金强韧性的目的。快速凝固合金中沉淀相具有较高的析出动力, 短时间时效后硬度达到峰值所需时间较短, 并且材料晶粒尺寸较小。与单级时效相比, 在总时效时间相同的情况下, Al_3Li 相尺寸变化不大, 分级时效使晶界平衡相数量减少, 无沉淀带宽度减小, 从而使材料具有较好的综合力学性能^[94]。

③ 预变形处理

铝锂合金固溶处理后、人工时效前进行适当的

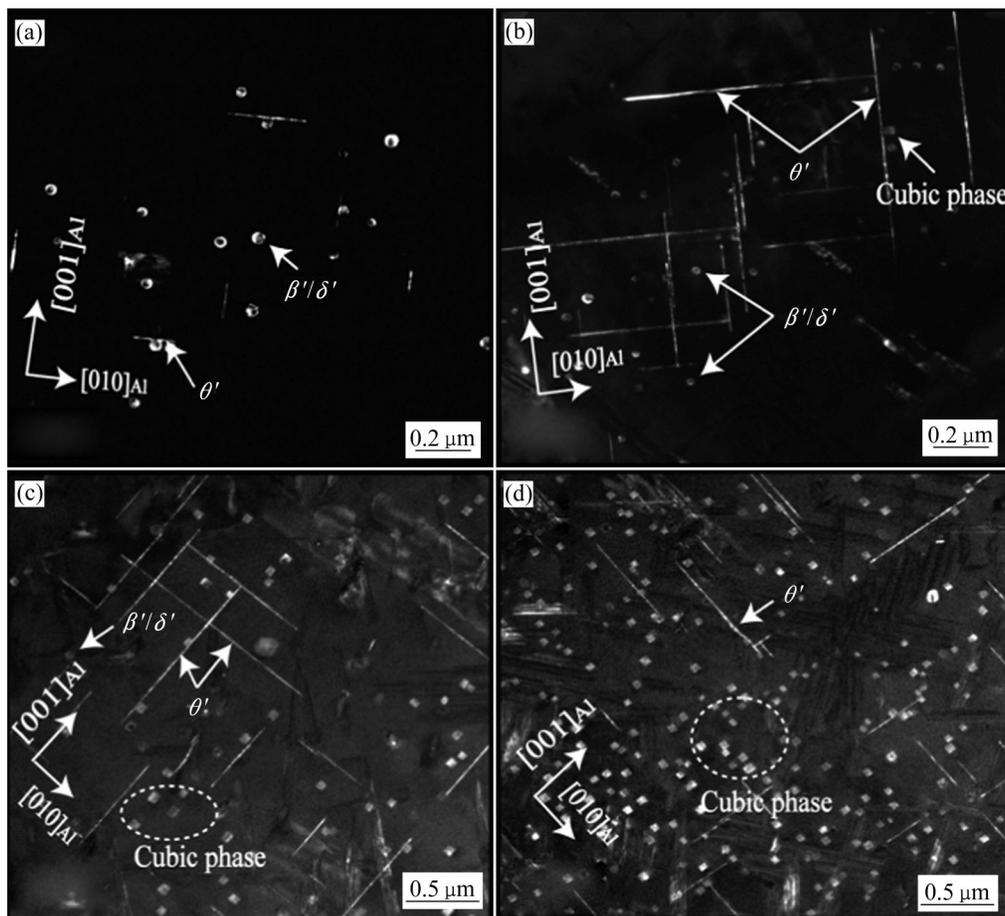


图 12 Al-Cu-Li 铝锂合金 160 °C 时效不同保温时间 TEM 像^[93]

Fig. 12 TEM images of Al-Cu-Li alloy under different aging time at 160 °C^[93]: (a) 26 h; (b) 104 h; (c) 159 h; (d) 720 h

冷变形,可以产生加工硬化效应,同时在合金基体中形成大量的位错,增加 T_1 相的形核点,从而促使 T_1 相弥散均匀析出。时效前的预变形能够减小晶界析出相的尺寸和减少其数量,增加位错不能切过的第二相的体积分数,从而降低合金晶界处的应力集中和共面滑移^[95]。XIAO等^[96]采用电流辅助时效与预变形相结合的方法提高Al-Mg-Li合金的力学性能,发现与常规时效工艺相比,预变形可以显著缩短合金达到峰值时效的时间,同时提高 Al_3Li 相的体积分数,使合金得到有效强化。对于快速凝固粉末冶金铝锂合金,时效前的冷变形还能促进合金中氧化物颗粒的均匀分布,提高合金伸长率而不降低强度^[97]。铝锂合金中引入 T_1 相和 S 相有利于分散滑移,但其强韧化效果很大程度上取决于析出相的弥散程度,预变形加工能促进 T_1 相和 S 相的弥散分布,但难以实现微观上的完全均匀分布,强韧化效果有限。形变热处理能有效提高合金的强韧性,但对于复杂结构的合金构件在工艺上难以实行。

3.2.3 熔体净化

在熔炼过程中铝锂合金不但容易发生高温氧化,形成氧化夹杂,而且具有强烈的吸氢倾向,少量的氢即可导致铝锂合金韧性的大幅下降。降低铝锂合金中锂的含量不但可以减小熔炼过程中熔体氧化和吸氢倾向,而且还可以弱化由于 Al_3Li 相析出而引起的共面滑移。采用真空熔炼法可使合金熔体中O、H含量显著降低。铸造过程中熔体的洁净程度还受元素污染和夹杂物影响,这些物质对铝锂合金的强度和韧性同样有很大影响。Na、K、S等元素污染熔体后容易聚集在晶界处,导致晶界强度降低。在铝合金中常见的夹杂物包括 Al_7Cu_2Fe 和 $Al_{12}(Fe\ Mn)_3Si$ 颗粒,颗粒粒径一般大于 $1\ \mu m$ 。因此,制备铝锂合金时最好使用高纯铝,同时熔炼需在熔剂或惰性气体保护下进行,并严格控制合金的除气工艺,确保铝锂合金具有较高的纯净度。

4 结论与展望

随着航空航天、交通运输等工业的发展,对装备构件轻量化的需求更为迫切,铝锂合金以其低密度、高强度和优异的耐腐蚀性能等优点受到越来越多的关注。经过近一个世纪的发展,铝锂合金研究已经从简单的Al-Li二元合金扩大到复杂组元的铝

锂合金,合金体系逐步完善,具有大量代替常规铝合金的潜力。尽管我国铝锂合金研究取得了不错的成绩,但整体水平相比于欧美等发达国家还存在一定的差距,体现在具有自主知识产权并获得应用的合金牌号少,产品规模小,基础研究缺乏系统性和完整性。在今后的发展过程中,我国应该继续深入研究铝锂合金成分组成、组织结构和性能之间的关系,形成具有自主知识产权的铝锂合金体系;同时深入探究合金在变形加工、热处理以及服役状态下的组织结构演变规律。

快速凝固技术对改善铝锂合金的组织 and 性能具有重要意义,快速凝固合金具有成分均匀、组织细小、第二相弥散分布等优点。然而,近年来关于快速凝固铝锂合金的研究还不够深入和系统,导致技术优势无法充分发挥。发展多种类型快速凝固铝锂合金,进一步探索合金元素对快速凝固铝锂合金组织和性能的影响规律,揭示物相组成、形态和分布及晶粒等显微组织特征在成形、变形加工、热处理等过程的演变规律,结合应用需求明确合金力学、耐腐蚀、抗疲劳等性能与合金成分和工艺过程的关联性,形成适合工业化稳定生产的工艺制度,对新型快速凝固铝锂合金的研究、开发与应用具有重要的意义。

REFERENCES

- [1] LAVERNIA E J, SRIVATSAN T S, MOHAMEDF A. Strength, deformation, fracture behaviour and ductility of aluminum-lithium alloys[J]. *Journal of Materials Science*, 1990, 25: 1137-1158.
- [2] PRASAD N, GOKHALE A A, RAO P R. Mechanical behaviour of aluminium-lithium alloys[J]. *Sadhana*, 2003, 28: 209-246.
- [3] GOMIERO P, BRECHET Y, LOUCHET F, et al. Microstructure and mechanical properties of a 2091 AlLi alloy- II. Mechanical properties: Yield stress and work hardening[J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1992, 40(4): 857-861.
- [4] 王祝堂. 美国铝业公司建成世界最大铝-锂合金厂[J]. *轻合金加工技术*, 2019, 47(11): 46.
WANG Zhu-tang. Alcoa builds the world's largest aluminum-lithium alloy plant[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2019, 47(11): 46.
- [5] 尹登峰, 郑子樵. 铝锂合金研发的历史与现状[J]. *材料导*

- 报, 2003, 17(2): 18-20.
- YIN Deng-feng, ZHENG Zi-qiao. History and current status of aluminum-lithium alloys research and development[J]. Materials Reports, 2003, 17(2): 18-20.
- [6] RIOJA R J, LIU J. The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43: 3325-3337.
- [7] 徐进军, 康唯, 都昌兵. 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.
- XU Jin-jun, KANG Wei, DU Chang-bing. Research status and development trends of Al-Li alloys for aeronautic and astronautic industry[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2017, 40(3): 132-137.
- [8] 陈建. 铝锂合金的性能特点及其在飞机中的应用研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2011, 1: 39-41.
- CHEN Jian. Research on the performance characteristics of aluminum-lithium alloy and its application in aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2011, 1: 39-41.
- [9] PEEL C J, EVANS B, MCDARMAID D S. Development of aluminum-lithium alloys in UK[J]. Metals and Materials, 1987, 8: 449-455.
- [10] RIOJA R. Fabrication methods to manufacture isotropic Al-Li alloys and products for space and aerospace applications[J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 257(1): 100-107.
- [11] GRUSHKO O, OVSYANNIKOV B, OVCHINOKOV V. Aluminum-lithium alloys process metallurgy, physical metallurgy and welding[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [12] FRIDLANDER I N. Structural aluminum-lithium alloys[J]. Metal Science and Heat Treatment, 1990, 32: 235-245.
- [13] 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 Hong-ping, YE Ling-ying, DENG Yun-lai, et al. Progress of aircraft Al-Li alloys[J]. Materials China, 2016, 35(11): 856-862.
- [14] SUGAMATA M, BLANKENSHIP JR C P, STARKE JR E A. Predicting plane strain fracture toughness of Al-Li-Cu-Mg alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 1993, 163(1): 1-10.
- [15] JATA K V, STARKE JR E A. Fracture toughness of Al-Li-X alloys at ambient and cryogenic temperatures[J]. Scripta Metallurgica, 1988, 22(9): 1553-1556.
- [16] BLANKENSHIP JR C P, KAISAND L R. Elevated temperature fatigue crack propagation behavior of an Al-Li-Cu-Mg-Ag-Zr alloy[J]. Scripta Materialia, 1996, 34(9): 1455-1460.
- [17] EL-ATY A A, XU Y, GUO X Z, et al. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al-Li alloys: A review[J]. Journal of Advanced Research, 2018, 10: 49-67.
- [18] 王硕, 张弛, 王俊升. 铝锂合金纳米析出相结构与性能综述[J]. 航空制造技术, 2021, 64(9): 68-76.
- WANG Shuo, ZHANG Chi, WANG Jun-sheng. Structures and properties of nano-precipitates in Al-Li alloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(9): 68-76.
- [19] WANHILL R, BRAY G. Aluminum-lithium alloys: Processing, properties, and applications[M]. Holland: Elsevier, 2014.
- [20] 杨富强, 熊慧, 任柏峰, 等. 先进铝锂的发展及应用[J]. 世界有色金属, 2018, 22: 1-5.
- YANG Fu-qiang, XIONG Hui, REN Bai-feng, et al. Development and application of advanced aluminum-lithium alloy[J]. World Nonferrous Metals, 2018, 22: 1-5.
- [21] 郑卓阳, 程仁寨, 肖栋, 等. 铝锂合金的发展、特点与其在客机结构上的应用[C]//2018年中国铝加工产业年度大会论文集. 佛山, 中国会议, 2018: 1012-1022.
- ZHEN Zhuo-yang, CHENG Ren-zhai, XIAO Dong, et al. Development and characteristics of Al-Li alloy and its application in passenger aircraft structure[C]//China Aluminum Processing Industry Annual Conference Article Serials. Foshan: China Nonferrous Metals Fabrication Industry Association, 2018: 1012-1022.
- [22] 刘静安, 朱献文. Al-Li合金的发展与应用[J]. 轻合金加工技术, 1996, 24(5): 2-5.
- LIU Jing-an, ZHU Xian-wen. Development and application of Al-Li alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 1996, 24(5): 2-5.
- [23] 王一唱, 童鑫, 游国强, 等. 铝锂合金组织、性能及成形工艺的研究现状与展望[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(3): 1069-1082.
- WANG Yi-chang, TONG Xin, YOU Guo-qiang, et al. Research progress and prospects of the microstructures, properties, and forming techniques of Al-Li alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(3): 1069-1082.
- [24] 冯朝辉, 于娟, 郝敏, 等. 铝锂合金研发进展及发展趋势[J]. 航空材料学报, 2020, 40(1): 1-11.
- FENG Zhao-hui, YU Juan, HAO Min, et al. Research progress and development trend of aluminum-lithium alloys[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(1): 1-11.
- [25] 彭雨. 铸造 Al-3Li-1.5Cu-0.2Zr 合金热处理工艺与组织性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- PENG Yu. Study on the heat treatment process,

- microstructures and mechanical properties of cast Al-3Li-1.5Cu-0.2Zr alloy[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [26] ZOU C L, GENG G H, CHEN W Y. Development and application of aluminum-lithium alloy[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 599/601: 12-17.
- [27] 樊振中, 陆政, 张显峰, 等. 铸造铝锂合金研究进展及应用趋势[C]//中国铸造活动周论文集. 郑州: 中国机械工程学会, 2014: 1-9.
- FAN Zhen-zhong, LU Zheng, ZHANG Xian-feng, et al. Development and application of aluminium-lithium casting alloy[C]//China Foundry Congress Article Serials. Zhengzhou: Chinese Mechanical Engineering Society, 2014: 1-9.
- [28] 向曙光, 蒋呐, 罗杰. 熔剂在铝锂合金中的行为[J]. *铝加工*, 2000, 23(2): 8-13.
- XIANG Shu-guang, JIANG Na, LUO Jie. Behavior of flux in Al-Li alloy[J]. *Aluminum Fabrication*, 2000, 23(2): 8-13.
- [29] RONG M, ZHANG L, WU G H, et al. Effect of refining processes on inclusions and mechanical properties of cast Al-2Li-2Cu-0.2Zr alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29: 1375-1382.
- [30] 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.
- ZHEN Ping. Study on the preparation process and performance of 8090 Al-Li alloy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [31] 邱惠中, 吴志红. 国外航天材料的新进展[J]. *宇航材料工艺*, 1997(4): 5-16.
- QIU Hui-zhong, WU Zhi-hong. Development of aerospace materials abroad[J]. *Aerospace Materials and Technology*, 1997(4): 5-16.
- [32] 卢健, 陆政, 杨天, 等. 5A90铝锂合金真空熔炼技术研究[J]. *世界有色金属*, 2019, 6: 188-190.
- LU Jian, LU Zheng, YANG Tian, et al. Study of 5A90 aluminum-lithium alloy vacuum melting[J]. *World Nonferrous Metals*, 2019, 6: 188-190.
- [33] 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: 24-33.
- [34] ZHU X, SCHOENITZ M, DREIZIN E L. Mechanically alloyed Al-Li powders[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2007, 432(1/2): 111-115.
- [35] MENDOZA-DUARTE J M, SAGARNAGA-FERNANDEZ M, MORENO-RESENDIZ E G, et al. Aluminum-lithium alloy prepared by a solid-state route applying an alternative fast sintering route based on induction heating[J]. *Materials Letters*, 2020, 263: 1-4.
- [36] YANG M, DAI Y, SONG C, et al. Microstructure evolution of grey cast iron powder by high pressure gas atomization[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(2): 351-355.
- [37] 许德, 高华兵, 董涛, 等. 增材制造用金属粉末研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(2): 245-257.
- XU De, GAO Hua-bing, DONG Tao, et al. Research progress of metal powder for additive manufacturing[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(2): 245-257.
- [38] LIU D M, YÜREKLI B, ULLSPERGER T, et al. Microstructural aspects of additive manufacturing of Al-Li alloys with high Li content[J]. *Materials Design*, 2021, 198: 1-8.
- [39] RAFFEIS I, ADJEI-KYEREMEH F, VROOMEN U, et al. Characterizing the microstructure of an additively built Al-Cu-Li alloy[J]. *Materials*, 2020, 13(22): 1-18.
- [40] 刘咏, 曹远奎, 吴文倩, 等. 粉末冶金高熵合金研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(9): 2155-2184.
- LIU Yong, CAO Yuan-kui, WU Wen-qian, et al. Progress of powder metallurgical high entropy alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(9): 2155-2184.
- [41] KIM N J. Structure and properties of rapidly solidified Al-Li-Cu-Mg-Zr alloys with a high zirconium content[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1992, 158(1): 103-110.
- [42] KUANG Q B, WANG R C, PENG C Q, et al. Comparison of microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Li-Sc-Zr alloys processed by ingot metallurgy and rapid solidification[J]. *Journal of alloys and compounds*, 2021, 883: 1-12.
- [43] XU R, LI R D, YUAN T C, et al. Microstructure, metallurgical defects and hardness of Al-Cu-Mg-Li-Zr alloy additively manufactured by selective laser melting[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 835: 1-11.
- [44] WEBSTER D. Aluminum-lithium powder metallurgy alloys with improved toughness[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1988, 19: 603-615.
- [45] NAMKWON Y, JINKOH H, LEE S, et al. Effects of microstructural evolution on superplastic deformation characteristics of a rapidly solidified Al-Li alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, 32: 1649-1658.
- [46] ZHEN L, CUI Y X, SHAO W Z, et al. Deformation and fracture behavior of a RSP Al-Li alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2002, 336(1/2): 135-142.
- [47] 黄伯云, 韦伟峰, 李松林, 等. 现代粉末冶金材料与技术进展[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(9): 1917-1933.
- HUANG Bai-yun, WEI Wei-feng, LI Song-lin, et al.

- Development of modern powder metallurgy materials and technology[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(9): 1917–1933.
- [48] CUI L, LI X, HE D, et al. Effect of Nd: YAG laser welding on microstructure and hardness of an Al-Li alloy[J]. *Materials Characterization*, 2012, 71: 95–102.
- [49] QI Y, ZHANG H, NIE X J, et al. A high strength Al-Li alloy produced by laser powder bed fusion: Densification, microstructure, and mechanical properties[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 35: 1–10.
- [50] 张新瑞. 2195 铝锂合金激光选区熔化成形及裂纹缺陷调控[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- ZHANG Xin-rui. Selective laser melting of AA2195 Al-Li alloy and crack defect control[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [51] JIAO S K, CHENG X, SHEN S X, et al. Microstructure evolution and mechanical behavior of Al-Li alloy fabricated by laser melting deposition technique[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 821: 1–8.
- [52] 于桂复, 焦成革, 戴圣龙. 快速凝固(RS) Al-Li 合金研究[J]. *高技术通讯*, 1994, 1: 21–25.
- YU Gui-fu, JIAO Cheng-ge, DAI Sheng-long. Advance in the research of rapidly solidified Al-Li alloys[J]. *High Technology Letters*, 1994, 1: 21–25.
- [53] 张义文, 刘建涛. 粉末高温合金研究进展[J]. *中国材料进展*, 2013, 32(1): 1–11.
- ZHANG Yi-wen, LIU Jian-tao. Development in powder metallurgy superalloy[J]. *Materials China*, 2013, 32(1): 1–11.
- [54] HENEIN H, UHLENWINKEL V, FRITSCHING U. *Metal sprays and spray deposition*[M]. Cham: Springer, 2017: 265–295.
- [55] LAVERNIA E J, MCKEWAN G W, GRANT N J. Structure and properties of rapidly solidified aluminum alloys 2024 and 2024 plus 1% lithium using liquid dynamic compaction[J]. *Progress in Powder Metallurgy*, 1986, 42: 457–477.
- [56] WANG X Y, MA X W, ZHAO G Q, et al. Microstructure evolution of spray deposited and as-cast 2195 Al-Li alloys during homogenization[J]. *Journal of Materials Science Technology*, 2021, 82: 161–178.
- [57] PU Q Q, JIA Z H, KONG Y P, et al. Microstructure and mechanical properties of 2195 alloys prepared by traditional casting and spray forming[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2020, 784: 1–11.
- [58] WANG Y X, ZHAO G Q, XU X, et al. Microstructures and mechanical properties of spray deposited 2195 Al-Cu-Li alloy through thermo-mechanical processing[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 727: 78–89.
- [59] 李劲风, 宁红, 刘丹阳, 等. Al-Cu-Li 系铝锂合金的合金化与微合金化[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(2): 258–279.
- LI Jing-feng, NING Hong, LIU Dan-yang, et al. Alloying and micro-alloying in Al-Cu-Li series alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(2): 258–279.
- [60] RAMBABU P, ESWARA PRASAD N, KUTUMBARAO V V, et al. *Aerospace Materials and Material Technologies*[M]. New York: Springer, 2016.
- [61] TRUONG C T, KABISCH O, GILLE W, et al. Small angle X-ray scattering and electrical resistivity measurements on an Al-2Li-5Mg-0.1Zr alloy[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2002, 73: 268–273.
- [62] MENG F L, CHAI Z G, LI J X, et al. Small-angle X-ray scattering study of the δ' phase growth kinetic in 1420 Al-Li alloy[J]. *Materials Characterization*, 2001, 47(1): 43–46.
- [63] 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: 232–238.
- [64] 肖寒. 5A90 铝锂合金板材电流辅助成形与组织性能调控一体化技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- XIAO Han. Integrated technology for electropulsing assisted forming and microstructure-performance control of 5A90 Al-Li alloy sheet[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [65] GAULT B, CUI X Y, MOODY M P, et al. Atom probe microscopy investigation of Mg site occupancy within δ' precipitates in an Al-Mg-Li alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2012, 66(11): 903–906.
- [66] 郑子樵, 李劲风, 陈志国, 等. 铝锂合金的合金化与微观组织演化[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(10): 2337–2351.
- ZHENG Zi-qiao, LI Jing-feng, CHEN Zhi-guo, et al. Alloying and microstructural evolution of Al-Li alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(10): 2337–2351.
- [67] ZHENG Y H, LIU Y X, WILSON N, et al. Solute segregation induced sandwich structure in Al-Cu(-Au) alloys[J]. *Acta Materialia*, 2020, 184: 17–29.
- [68] ZHANG J, WANG C, ZHANG Y, et al. Effects of creep aging upon Al-Cu-Li alloy: Strength, toughness and microstructure[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 764: 452–459.
- [69] BOURGEOIS L, MEDHEKAR N V, SMITH A E, et al. Efficient atomic-scale kinetics through a complex heterophase interface[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111: 046102.

- [70] LV K X, ZHU C Y, ZHENG J X, et al. Precipitation of T_1 phase in 2198 Al-Li alloy studied by atomic-resolution HAADF-STEM[J]. *Journal of Materials Research*, 2019, 34(20): 3535–3544.
- [71] RODGERS B, PRANGNELL P B. Quantification of the influence of increased pre-stretching on microstructure-strength relationships in the Al-Cu-Li alloy AA2195[J]. *Acta Materialia*, 2016, 108: 55–67.
- [72] DWYER C, WEYLAND M, CHANG L Y, et al. Combined electron beam imaging and ab initio modeling of T_1 precipitates in Al-Li-Cu alloys[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98: 1–3.
- [73] NOBLE B, THOMPSON G E. T_1 (Al₂CuLi) precipitation in aluminum-copper-lithium alloys[J]. *Metal Science Journal*, 1972, 6: 167–174.
- [74] GUMBANN E, LEFEBVRE W, GEUSER F D, et al. The effect of minor solute additions on the precipitation path of an Al-Cu-Li alloy[J]. *Acta Materialia*, 2016, 115: 104–114.
- [75] GUMBANN E, GEUSER F D, SIGLI C, et al. Influence of Mg, Ag and Zn minor solute additions on the precipitation kinetics and strengthening of an Al-Cu-Li alloy[J]. *Acta Materialia*, 2017, 133: 172–185.
- [76] YU X X, ZHAO Z G, SHI D D, et al. Enhanced high-temperature mechanical properties of Al-Cu-Li alloy through T_1 coarsening inhibition and Ce-containing intermetallic refinement[J]. *Materials*, 2019, 12(9): 1–14.
- [77] CHEN X X, MA X W, XI H K, et al. Effects of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of extruded 2196 Al-Cu-Li alloy[J]. *Materials Design*, 2020, 192: 1–15.
- [78] BETSOFEN S Y A, ANTIPOV V V, KNYAZEV M I. Al-Cu-Li and Al-Mg-Li alloys: Phase composition, texture, and anisotropy of mechanical properties (review)[J]. *Promising Materials and Technologies*, 2016, 4: 326–341.
- [79] WANG S C, STARINK M J. Precipitates and intermetallic phases in precipitation hardening Al-Cu-Mg- (Li) based alloys[J]. *International Materials Reviews*, 2005, 50(4): 193–215.
- [80] 甘卫平, 周兆锋, 杨伏良. Al-Li合金强韧化机理及途径[J]. *材料导报*, 2003, 17(9): 13–16.
GAN Wei-ping, ZHOU Zhao-feng, YANG Fu-liang. Obdurability of Al-Li alloy: Mechanism and improvement methods[J]. *Materials Reports*, 2003, 17(9): 13–16.
- [81] PENG Z W, LI J F, SANG F J, et al. Structures and tensile properties of Sc-containing 1445 Al-Li alloy sheet[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 747: 471–483.
- [82] SURESH M, SHARMA A, MORE A M, et al. Effect of scandium addition on evolution of microstructure, texture and mechanical properties of thermo-mechanically processed Al-Li alloy AA2195[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 740: 364–374.
- [83] ZHANG X L, ZHANG L, WU G H, et al. Influence of Sc content on the microstructure and mechanical properties of cast Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.2Zr alloy[J]. *Materials Characterization*, 2018, 142: 223–236.
- [84] 尹登峰, 余志明, 陶颖, 等. Al-Li合金的合金化及组织研究进展[J]. *材料导报*, 2005, 19(2): 84–86.
YIN Deng-feng, YU Zhi-ming, TAO Ying, et al. Research progress in effects of elements on microstructure of aluminum-lithium alloys[J]. *Materials Reports*, 2005, 19(2): 84–86.
- [85] WANG Y X, ZHAO G Q, Xu X, et al. Constitutive modeling, processing map establishment and microstructure analysis of spray deposited Al-Cu-Li alloy 2195[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 779: 735–751.
- [86] YANG Q B, WANG X Z, LI X, et al. Hot deformation behavior and microstructure of AA2195 alloy under plane strain compression[J]. *Materials Characterization*, 2017, 131: 500–507.
- [87] ZHANG F, SHEN J, YAN X D, et al. High temperature flow behavior modeling of 2099 alloy considering strain effects[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(3): 798–805.
- [88] OU L, ZHENG Z Q, NIE Y F, et al. Hot deformation behavior of 2060 alloy[J]. *Journal of Alloys Compounds*, 2015, 648: 681–689.
- [89] OU L, NIE Y F, ZHENG Z Q. Strain compensation of the constitutive equation for high temperature flow stress of a Al-Cu-Li alloy[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23: 25–30.
- [90] 王天祥, 鲁世强, 王克鲁, 等. Ti60合金热变形过程中的软化机制[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(6): 1338–1348.
WANG Tian-xiang, LU Shi-qiang, WANG Ke-lu, et al. Softening mechanism of Ti60 alloy during hot deformation[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(6): 1338–1348.
- [91] 王欣, 刘栋, 程序. 热处理工艺对激光增材制造铝锂合金组织及力学性能的影响[J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 1–8.
WANG Xin, LIU Dong, CHENG Xu. Effect of heat treatment process on microstructures and mechanical properties of laser additive manufactured Al-Li alloys[J]. *Chines Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 1–8.
- [92] 陈振华, 陈鼎. 快速凝固粉末铝合金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.

- CHEN Zhen-hua, CHEN Ding. Rapid solidification powder aluminum alloy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [93] JIANG B, CAO F H, WANG H S, et al. Effect of aging time on the microstructure evolution and mechanical property in an Al-Cu-Li alloy sheet[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2019, 740/741: 157-164.
- [94] 金头男, 尹志民, 张新明, 等. 双级时效对快速凝固 Al-Li 合金组织和性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 1992, 4(2): 60-64.
- JIN Tou-nan, YIN Zhi-ming, ZHANG Xin-ming, et al. Effect of two-step aging treatment on microstructure and mechanical properties of Al-Li alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1992, 4(2): 60-64.
- [95] 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, 18(5): 30-32.
- ZHOU Chang-rong, PAN Qing-lin, ZHU Chao-ming, et al. Development and study of new types aluminum-lithium alloys[J]. *Materials Reports*, 2004, 18(5): 30-32.
- [96] XIAO H, ZHANG K F, SHI C C, et al. Influence of electropulsing treatment combined with pre-deformation on ageing behavior and mechanical properties of 5A90 Al-Li alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 784: 1234-1247.
- [97] 余正华, 于桂复, 颜鸣皋. 快速凝固粉末铝锂合金的研究及发展[J]. *材料工程*, 1988, 4: 33-35.
- YU Zheng-hua, YU Gui-fu, YAN Ming-gao. The development of rapidly solidified powder metallurgy aluminum-lithium alloys[J]. *Journal of Materials Engineering*, 1988, 4: 33-35.

Research progress on preparation and obdurability of aluminum-lithium alloy

KUANG Quan-bo¹, WANG Ri-chu^{1,2}, PENG Chao-qun¹, CAI Zhi-yong¹, FENG Yan¹, WANG Xiao-feng¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on High-strength Structural Materials, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Aluminum-lithium alloy has the advantages of low density, high strength, high elastic modulus and good corrosion resistance, which is widely used in aerospace and military industry fields. In this paper, the development and application of Al-Li alloy were summarized. The preparation methods, such as casting, powder metallurgy, and spray deposition were introduced. The obdurability mechanism and improvement methods of aluminum-lithium alloy was reviewed. Finally, the prospects for the future development of aluminum-lithium alloy were given.

Key words: aluminum-lithium alloy; preparation method; alloying; obdurability; heat treatment

Received date: 2021-09-08; **Accepted date:** 2022-01-21

Corresponding author: CAI Zhi-yong; Tel: +86-731-88836638; E-mail: zycaimse@163.com

(编辑 龙怀中)