

铸造铝锂合金研究进展及应用趋势

樊振中, 陆政, 张显峰, 王胜强, 刘建军

(中国航空工业集团公司北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 概述了铸造铝锂合金的化学成分、工艺性能、分类及发展历程, 对近年来铸造铝锂合金在国内外航空航天武器装备领域的应用情况进行了说明。依据铸造铝锂合金的熔炼、浇注及工艺成形特点, 对国内外近年来铸造铝锂合金元素成分设计、熔炼保护工艺、铸型材料选择、精密凝固成形与热处理工艺技术的研究进展进行了介绍。结合铸造铝锂合金国外重点研究领域与国内研制现状, 阐述了铸造铝锂合金国外未来的研究热点与国内应重点关注的发展方向, 并提出了国内铸造铝锂合金的工艺研制路线。

关键词: 铝锂合金; 成分设计; 熔炼保护; 凝固成形; 热处理

Development and Application of Aluminium-Lithium Casting Alloy

FAN Zhen-zhong, LU Zheng, ZHANG Xian-feng, WANG Sheng-qiang, LIU Jian-jun

(Aviation Industry Corporation of China, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

Abstract: The chemical composition, process performance, classification and development process of aluminium-lithium alloy, following with research and applications in the aviation and aerospace weaponry equipment both at home and abroad were summarized. Based on the melting, filling and forming process characteristics of aluminium-lithium casting alloy, the research progress occurred at abroad and domestic of element composition design, melting protection technology, mold material selection, precision forming of solidification and heat treatment technology in recent years were introduced. In combination with the foreign key research areas and domestic development status of aluminium-lithium casting alloy, the foreign future research focus and intensive development direction that domestic should pay attention to was elaborated, the technology evolution route of aluminium-lithium casting alloy developed in the domestic was proposed and optimized.

Key words: aluminium-lithium alloy; composition design; melting protection; solidification forming; heat treatment

锂是最轻的金属元素, 其密度仅有 0.53g/cm^3 ^[1], 铝合金中加入 2%~3% 的锂, 可使密度减少 8%, 弹性模量提高 15%, 比刚度增加 20%~30%, 铝锂合金是高强度、高弹性模量、超轻型的铝合金材料^[2-4]。铝锂合金按加工工艺可分为铸造铝锂合金、变形铝锂合金、粉末冶金铝锂合金等; 按性能可分为高强度、中等强度、抗腐蚀性、损伤容限等类型; 按化学成分可分为 Al-Li-Mg、Al-Li-Cu-Mg-Zr、Al-Cu-Li-Mg-Zr 等系列^[5]。

铝锂合金作为一种低密度、高弹性模量、高比强度和高比刚度的铝合金, 在航空航天领域显示出了广阔的应用前景^[6, 7]。虽然早在 1924 年德国的材料专家就开发出了第一个含 Li 的铝合金 Seleron, 但是直到 1961 铝锂合金才真正引起人们的注意。美国将 2020 铝锂合金应用于海军 RA-5C 军用预警飞机的机翼蒙皮和尾翼水平安定面上, 获得了 6% 的减重效果^[8]。1965 年, 在详细研究 Al-Mg-Li 三元相图 and 不同成分合金力学性能的基础上, 前苏联研制成功了 1420 铝锂合金; 1989 年, 前苏联研制生产了 1430 铝锂合金, 从此前苏联的铝锂合金构成了一个完整的发展体系。美国 Alcoa 公司于 1984 年研制出了 2090 铝锂合金, 1989 年美国 Martin Marietta 和 Reynolds 公司研制成功了 Weldatite 049 可焊铝锂合金。1980~1991 年分别在美国、英国、法国、德国召开了 6 次 Al-Li 合金国际会议, 铝锂合金逐渐受

作者简介: 樊振中 (1985-), 男, 工程师, E-mail: fanzhenzhong2010@163.com。

到各国研究单位的重视。

80 年代以来,国内外对铝锂合金的开发几乎完全局限于变形铝锂合金,但是高速和高加速度的部件也适合采用铝锂合金,如马达活塞和涡轮发动机的叶轮等,这些部件形状复杂,通常须采用铸造生产^[9]。随后国外相继开展了大量的铸造铝锂合金研制工作,并在航空与航天领域进行了推广应用,在提高航空航天先进武器装备构件比刚度与弹性模量的同时实现了构件的减重。

1 铸造铝锂合金在航空航天领域的应用

德国早在上世纪 80 年代就研制出了一种具有两相显微组织的 Al-Si-Li 三元合金^[3]。Rex.Precision Product 公司生产了牌号为 PPPX 的铝锂合金熔模铸件,结合热等静压工艺使该合金的力学性能远远高于 A356 合金,同时减重 5%~8%,刚度增加 10%~15%,尤其是铸件壁厚仅为 1.52.0mm。Howmet Corp 公司已将铝锂合金熔模铸件应用于飞机的附件上,采用惰性气体保护,陶瓷铸型浇注的铝锂合金材料强度达到了 A357 合金的水平,并减重 5%,同时刚度增加 11.5%,并发现采用铝锂合金后,铸件偏析小、收缩率低、晶粒细小及铸件表面质量较好^[10]。

铝锂合金铸件与变形铝锂合金一样,也具有低密度、高比刚度及较低的疲劳裂纹生长率,且含 Li 范围较宽,凝固时形成的各向同性组织使其具有较高的应力腐蚀抗力。同时铸造铝锂合金还具有较好的铸造工艺性能,尤其是该合金对型腔细小结构的复制能力一般要好于传统铝合金,可以用于制造航空航天用薄壁结构铸件^[11]。铸造铝锂合金自研制以来就在航空航天领域得到了广泛的应用^[12]。英国在意大利生产的 EH101 新型直升机使用了铸造铝锂合金,EH101 是第一架在主结构中使用铸造铝锂合金的飞机,重量减轻 20kg/架;1995 年服役的 C-17 军用战略运输机上也使用了铸造铝锂合金;美国洛克希德马丁与雷诺铝公司合作开发的铸造铝锂合金已经在 F-16“战隼”战斗机上得到了应用;俄罗斯在歼击机(米格-29、苏-27)、运输机(图 204、安-124)、直升机(米-6)、舰载机(雅克-36)等飞机上都尝试应用了铝锂合金铸件,例如米格-29 战机的精密仪器壳体和仪表安装架等^[5]。

在航天领域,由于铝锂合金比碳(石墨)/环氧复合材料具有更高的工作温度、较好的高温韧性和蠕变性能,在太空环境下不放气,加工性能好,特别是价格便宜,因此选用铸造铝锂合金作为贮箱、仪器舱等结构材料具有较大的优势^[1]。航天飞行器结构中,每增加 1kg 的有效载荷可带来 4400~110000 美元的经济效益,因此一些新型航空气间装备中铸造铝锂合金得到了广泛的应用。俄罗斯在“能源号”运载火箭中采用铸造铝锂合金制造了超低温燃料贮箱的连接杆;麦道公司的 X-33 运载火箭验证机 DC-AX 中,部分采用了俄罗斯制造的铝锂合金液氧贮箱支架铸件,减重 12kg^[2]。1997 年 12 月美国“奋进号”航天飞机外贮箱、日本在 2000 年用 H-II A 火箭发射的宇宙往返试验机 Hope-X 的机体以及在 1998~2002 年建设的国际空间站日本研究舱(JEM)上都适量采用了铝锂合金铸件,实现了减重、增加经济效益的目的^[13,14]。

美国波音公司生产的 B-747 前起落架支柱牵引连接接头、MD-11 远程三喷气式发动机飞机地板梁安装座、空中客车公司生产的 A320、A330 与 A340 机翼下缘整流罩也采用了铝锂合金铸件,实现了整体减重。

2 铸造铝锂合金研究现状

2.1 合金成分设计

铸造铝锂合金通过合金成分设计(改变 Cu/Li、Cu/Mg、Mg/Li 比等),添加 Ag、Ce、Y、La、Ti、Mn、Sc、Zr 等微合金元素,可以在合金中形成大量弥散而均匀分布的 T_1 、 S' 等析出相,减少引起局部平面滑移 δ' 相的影响,同时微合金元素的添加将促进 T_1 、 S' 、 θ' 相的析出,或者形成 Ω 、 η 、 η' 等相一起与 T_1 、 S' 、 θ' 相共同作用提高合金的强韧性,同时微合金元素的添加将改变强化相的尺寸、形貌与分布状况,减小无沉淀析出带(PFZ)宽度,提高合金的综合力学性能^[15]。

铸造铝锂合金中 Li 的共晶点为 8.22 ($\omega\%$)^[16],时效过程析出 δ' (Al_3Li) 相产生强化,析出过程为过饱和固溶体亚稳相 $\delta' \rightarrow$ 平衡相 δ ($AlLi$), δ' 相呈球状,晶格常数为 0.4nm,是合金时效的主要强化

相。 δ' 相与基体的错配度仅为 0.08%，这种共格易产生共面滑移，使位错在滑移面与晶界的交界处塞积，引起应力集中。Mg 元素的添加将促使铸造铝锂合金的溶解度曲线上移，减小 Li 的固溶度，促进 δ' 相的析出，增加 δ' 相的体积分数，同时增加 δ' 相与基体的错配度，有效提高合金的强度^[17]。

在合金中加入 Mn 可形成 Al_6Mn 粒子，改善铝锂合金的各向异性。过渡族元素（Zr、Ti、Hf、Mn、Cr、V 等）由于特殊的电子结构和独特的性质，添加到铝锂合金中对合金的性能有显著的改善，其中 Zr 的作用最多，既是最好的变质剂，又能阻碍位错滑移，提高合金的塑性和断裂韧性^[18]。Zr 与 Al 形成亚稳相 β' （ Al_3Zr ），呈棒状，晶格常数 $a=0.41\text{nm}$ 。Zr 原子在合金凝固中易与空位结合，导致与 Li 原子结合的空位减少，加速 δ' 相的析出；同时 δ' 相可以在 β' 相界面形核生长，形成 β' 相/ δ' 相复合结构相，增加与基体的错配度，有效地抑制共面滑移，并细化铸态晶粒与枝晶组织，改善合金的塑性^[19,20]。在铝锂合金中添加微量 Sc，可形成极细的三元共格相 $\text{Al}_3(\text{Sc}_{1-x}\text{Zr}_x)$ ，时效过程作为 δ' 相的非均匀形核的核心，形成 $\text{Al}_3\text{Li}/\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ 复合粒子，改变主要强化相 δ' 、 T_1 、 S' 相的尺寸和分布状况，或生成新的强化相^[21,22]。

此外加入少量的 Be 可抑制 Na 在晶界上的偏析，加入 Co、Ti、Ge 等元素可形成较多的非共格相或 δ' 的共生相，从而提高合金的韧塑性。适量 Ce 能够减少合金中 Fe、Si、Na、K 等杂质对塑性、断裂韧性的危害，起到强化晶界的作用，改善合金的断裂韧性，同时 Ce 在晶界偏析，可降低 Li 等溶质元素在基体中的扩散速度，抑制晶界附近 Li 等溶质的贫化，改善合金本征疲劳裂纹扩展抗力^[23]。加入 Ag 元素可有效改善铝锂合金的强韧性，首先 Ag 元素具有固溶强化效果，同时可以在位错或亚晶界处不均匀析出较大体积分数的 S' 弥散相，使得位错难以切过而只能绕过，从而降低了铝锂合金的共面滑移倾向，并激发位错产生交滑移，促进合金的均匀变形^[23]。添加少量的 Y 与 La（0.1%）可以减少 Fe、Si、Na 等杂质在晶界的偏聚，延缓时效过程，减小晶界无析出带的宽度，降低析出相与基体的界面能，增加 Li 与基体的结合能，使扩散系数 D 减小，促使较多的 β' 相析出，改善合金的断裂韧性^[24]。铸造铝锂合金经成分化设计后，合金密度（ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ）可由（1）式进行推算得到，（1）式中合金元素代表各元素所占的质量分数（ $\omega/\%$ ）。

$$\rho=2.71+0.024\text{Cu}+0.018\text{Zn}+0.022\text{Mn}-0.079\text{Li}-0.01\text{Mg}-0.04\text{Si} \quad (1)$$

2.2 熔炼保护工艺

合金的熔炼保护工艺对铸造铝锂合金而言至关重要。铝锂合金比一般铝合金容易吸氢，且较难去除，较高的氢含量易形成氢气泡、开裂、增加应力腐蚀敏感性和氢脆，并降低合金的塑性与断裂韧性，促进晶间开裂，加快疲劳裂纹扩展速率。含氢量超过一定范围后，会形成碱金属氧化物中最稳定的 LiH ，极难去除^[10]，严重影响铸造铝锂合金的开发和使用。由于锂具有极高的化学活性，在熔炼过程中极易与合金熔液反应生成一层很厚的灰色氧化物，不仅造成锂的烧损，还严重影响合金熔液的流动性并阻碍合金在结晶时气体的析出，导致气孔与疏松缺陷增加，且当其与氧和水接触时将导致锂的氧化损失，而且锂与氢的亲合力极强，在没有保护的条件下，熔化的铝锂合金铸锭含氢量比传统的铝合金高约 50 倍，吸氢和氧化严重影响着铝锂合金的力学性能，氢形成气孔以及与碱金属在晶界形成的氢氧化物都会降低合金的强度、伸长率和韧性，所以，铝锂合金必须在保护性气氛下熔炼，以及要求耐蚀性材料坩埚^[25]。

铸造铝锂合金研究早期多采用熔剂法与惰性气体保护法进行合金熔体的保护。一般常用 LiCl 、 LiF 、 KCl 等混合盐类作为熔剂；国外多采用 $\text{LiCl}+\text{LiF}$ 混合熔剂，效果较好，但是 LiF 成本较高。我国东北轻合金加工厂使用 50% $\text{LiF}+50\%\text{KCl}$ 混合保护熔剂，经充分搅拌后降温至 $500\sim 600^\circ\text{C}$ 以液态熔剂待用，或冷却至室温作固态熔剂使用，锂的烧损量控制在了每小时 0.14% 以下，但这种熔剂吸水性强，在使用前必须进行预热处理，常用的保护熔剂及其使用效果见图 1^[26]。在使用 MgCl_2 保护熔剂时，易导致 MgCl_2 与 Li 发生反应生成 LiCl 与 Mg，导致锂元素的烧损，并使铸件产生所谓贫镁区的“梅花”状组织，从这个角度讲，不应该使用 MgCl_2 ，但是加入 MgCl_2 后，其可以与 MgO 反应生成氯化物 $\text{MgCl}_2\cdot\text{MgO}$ ，利于 MgO 夹杂从合金熔液中去除，消除 MgO 的负面作用。

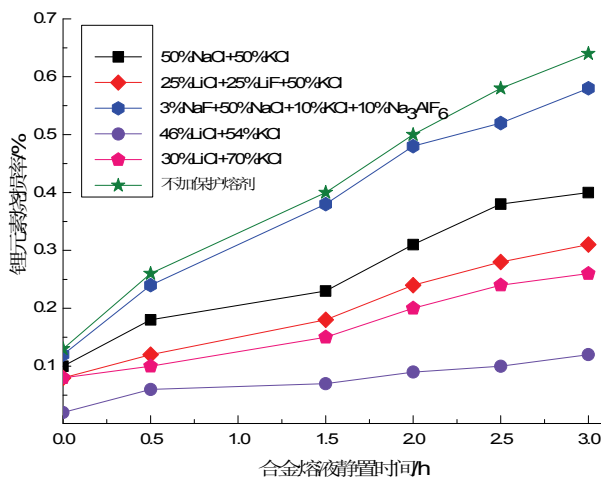


图1 铸造铝锂合金常用保护熔剂使用效果

铸造铝锂合金熔炼保护常用的惰性气体为氩气与氢气，为了防止氧、氮和水等混入保护气体中降低保护效果，要求保护气体具有一定的纯度，研究发现使用分子筛可以有效地净化惰性气体。为了降低液态金属的含氢量，除了保护性气氛和熔剂外，还要对熔体进行精炼，可以向熔体通入氩气、氯气精炼，也可使用 C_2Cl_6 进行精炼；或者在熔炼工序时进行真空除气，但此方法将会损失一定的锂含量，且精炼要分两次进行，加锂之前充分精炼一次，以减少锂损失，加锂之后，浇注前再次精炼。高纯石墨是最理想的坩埚材料，它对锂呈良好的惰性，而且具有优良的高温稳定性和热容性；陶瓷型材料虽然也可以用来制作坩埚，但它与锂的作用较石墨严重，材料成本高，而且对急冷急热非常敏感，使用寿命较低；铸铁也可用来制作坩埚，但为了保证铝锂合金的熔炼质量，需要在铸铁坩埚外边喷涂特殊的涂料，以防止熔炼过程引入杂质 Fe 元素。

氩气或混合气体（氩气与氢气）保护熔炼已得到广泛的工业应用，但成本较高；而熔剂保护法近年来则因保护效果差、污染环境等而鲜有采用。真空熔炼保护虽然设备投资高，但经济、操作方便，又不污染环境，因此是一种适用于开发研究的好方法。澳大利亚 Comalco 铝业有限公司利用真空纯化法，使铝锂合金溶液中的碱金属总含量由原来的 3~10ppm 降到 1ppm 以下，H 含量也显著降低，合金韧性显著提高。真空熔炼可保护锂、镁等合金元素免于氧化，但这些元素均属饱和蒸汽压较高的元素，在真空下将发生蒸发损失，元素的蒸发损失量见式(2)：

$$W = 2.63 \times 10^{-2} (P_i - P) \sqrt{\frac{M}{T}} \quad (2)$$

式(2)中： W 为蒸发率， $g/cm^2 \cdot min$ ； P_i 为元素的饱和蒸汽压，Pa； P 为熔体表面该元素的分压，Pa； M 为元素的原子量； T 为温度，K。在真空保护熔炼时，熔体表面合金元素的分压可近似地认为等于真空度下该元素的饱和蒸汽压。真空熔炼同时有利于除去合金熔体中的气体和夹杂物。氢气在铝熔体中的溶解度如式(3)所示：

$$S = K \sqrt{P_{H_2}} \quad (3)$$

式(3)中： S -氢气在熔体中的溶解度， cm^3 （标准状态）/100g 铝； K -溶解常数，它与温度和熔体的性质有关； P_{H_2} -熔体表面氢气分压，MPa。由式(3)可知，随着合金熔体表面氢气分压的降低， H_2 在铝锂合金熔体中的溶解度连续下降，大量 H_2 随之逸出，有利于获得优质的合金熔液。

2.3 铸型材料选择

铸造铝锂合金在凝固时，由于 Li 元素活泼易氧化，且随着凝固进行，铸锭内部的 H_2 不断外逸，铸型材料的选择将直接影响铸件的外观质量与表面缺陷。研究证明熔模壳型和陶瓷型与铝锂合金熔液间的反应极小，水玻璃砂铸型会在铝锂合金铸件表层产生大量气孔，而树脂砂铸型的这种倾向大大减小。

区别主要在于铸型粘结剂中的水分,采用 Al_2O_3 等陶瓷材料作涂料,虽然能减小合金熔液与铸型的界面作用,但却使铸型的透气性下降,反而增加了气孔倾向性^[27]。

水玻璃砂铸型在 300°C 以下烘烤焙烧时,其内部并未完全脱去自由结晶水,因此在浇注时与铝锂合金反应剧烈,水玻璃砂要完全脱去内部的自由结晶水,则需要在 400°C 以上进行烘烤焙烧,但此时水玻璃砂铸型的残留强度已大大降低,且粘砂严重。采用树脂砂铸型浇注铸造铝锂合金时,树脂砂铸型表面残留有黑色物质,该物质是有机粘结剂受热分解产生的含碳生成物。普通粘土砂铸型浇注铝锂合金后,皮下气孔严重,分析认为是粘土砂铸型与熔体反应形成粘砂,毛细孔道堵塞,使气体难以逸出而大量留存于铸件内部。粘土砂铸型刷上 Al_2O_3 涂料后,表面质量与气孔并未得到改善,而采用石墨和 ZrO 涂料后,不仅铸件表面光洁,且显著减小了气体的析出程度。 ZrO 涂料可能是与铝锂合金熔体发生反应,生成了 Al_3Zr ,通过与熔体的反应使得部分 Zr 溶入了铝基体中,石墨涂料主要是在砂型表面形成了一层复碳膜,受热后碳部分燃烧,留下通道,使得气体得以顺利排除。

树脂砂铸型在热烘烤后浇注铝锂合金,总体发气量较少,而涂刷涂料后,由于细微排气通道被堵塞,导致铸件皮下气孔增多。采用金属型铸型涂刷氧化锆涂料浇注铝锂合金后,铸造铝锂合金内部组织细小且多为等轴晶,涂刷的氧化锆涂料一方面起到了单质锆或锆盐的晶粒细化作用,即 Al_3Zr 作为铝锂合金的形核衬底;另外其还起到了与石墨粉一样的微冷作用,与树脂砂铸型相比,晶粒明显得到了细化。石膏铸型涂刷刚玉粉涂料浇注铝锂合金后,铸件表面存在一定数量的气孔,这与石膏铸型的导热和蓄热特性有关;而覆膜砂涂刷惰性涂料浇注铝锂合金后,铸件表面存在轻微的针孔。

2.4 精密凝固成形

铸造铝锂合金由于易氧化、易烧损,在重力环境下浇注时,易导致合金熔液在凝固过程不断氧化烧损,难以保证铸件的完整成形,因此需在真空保护环境下进行充型浇注。且铸造铝锂合金由于 Li 元素的添加,固/液相线温度间隔与常规铸造铝合金相比较宽,结晶时多为糊状凝固,在浇注薄壁复杂形状铸件时,凝固界面前沿易冷却收缩,阻碍合金熔液的充型,导致薄壁铸件难以完整成形。图 2、图 3 所示为 $\text{Al-6.5Mg-2.0Li-0.1Ti-0.1Zr}$ 铸造铝锂合金(作者目前在研)的固/液相线 K 偶(布置于铸件心部,同一区域布置 2 根 K 型热电偶)试验测试值与常规重力环境熔模壳型下浇注所得的 $\phi 5$ 力学性能测试试棒。

由图 2 可知, $\text{Al-6.5Mg-2.0Li-0.1Ti-0.1Zr}$ 铸造铝锂合金的凝固结晶温度范围较宽,约为 150°C ,极易以糊状方式进行凝固结晶,导致铸件内部产生缩孔与微观疏松等缺陷。由图 3 可知, $\text{Al-6.5Mg-2.0Li-0.1Ti-0.1Zr}$ 铸造铝锂合金在常规重力充型下,凝固界面前沿易冷却收缩,阻碍铝锂合金铸件的完整成形(见图 3 中矩形线框所示)。

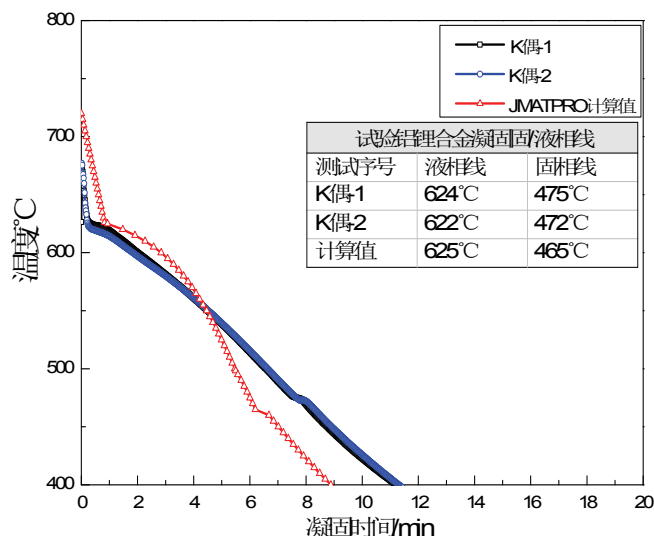
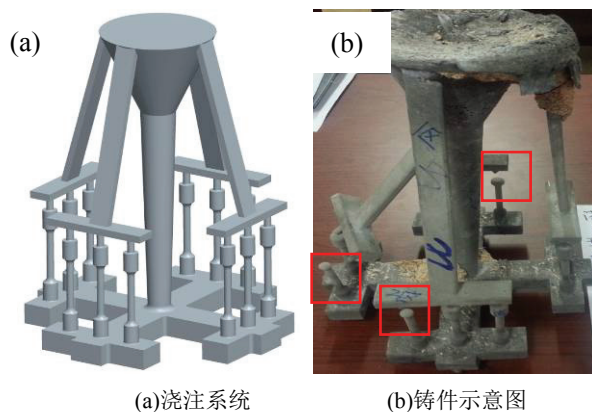
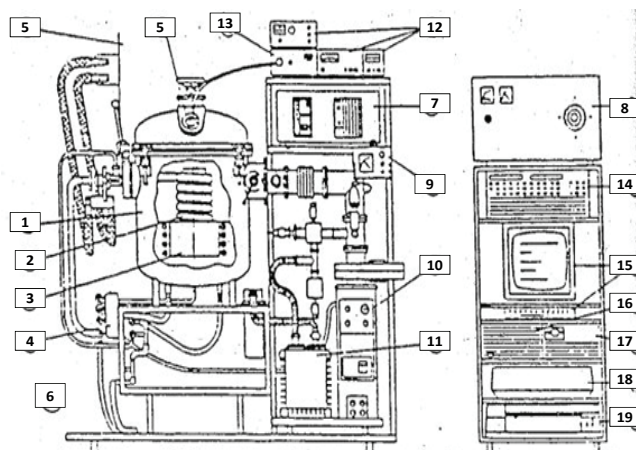


图 2 $\text{Al-6.5Mg-2.0Li-0.1Ti-0.1Zr}$ 铸造铝锂合金凝固固/液相线

图3 $\phi 5$ 力学性能测试试棒浇注系统与铸件示意图

由于国外铝锂合金铸件多用于航空航天等武器装备, 涉及军事秘密与国防安全, 因此国外针对铸造铝锂合金精密凝固成形已开展的成形工艺与特种成形设备研究的文献与资料报道较少。国内在铸造铝锂合金精密凝固成形工艺与成形设备研制方面仍处于起步探索阶段, 结合低压浇注、真空吸铸等常规反重力浇注工艺开展了部分试验工作。上海交通大学采用自制的真空调压可控气氛氩气保护装置成功浇注了 Al-1.0Mg-2.8Li-0.15Zr 铝锂合金, 并对调压充型凝固工艺进行了对比优化研究, 如图4与图5所示。研究表明: Al-1.0Mg-2.8Li-0.15Zr 铝锂合金熔液在真空调压可控气氛保护下充型可实现薄壁复杂铝锂合金铸件的完整精密成形, 且压力凝固下的合金组织较为致密。



1. 真空容器 2. 感应加热圈 3. 陶瓷壳型模加热装置 4. 冷却水循环路径 5. 设备后侧观察窗
6. 中频加热装置 7. TSC 控制器 8. 陶瓷壳型模加热用 9. 中频加热装置 10. 扩散泵控制台
11. 真空扩散泵 12. 真空测量装置 13. 冷光源 14. 测定值监视器 15. 终端键盘
16. 计算机 17. 软盘 18. 打印机 19. 图形记录仪

图4 铝锂合金真空保护调压浇注装置

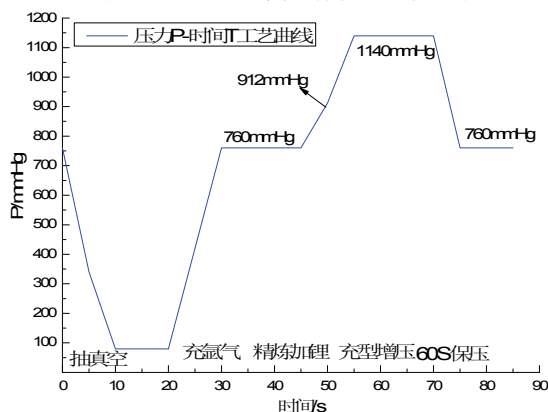


图5 铝锂合金真空保护调压充型工艺曲线

2.5 热处理工艺技术

铸造铝锂合金与变形铝锂合金最大的不同就是铸造铝锂合金无法进行时效前的预变形处理, 这一点对其性能极为不利, 因为主要的沉淀强化相 T_1 、 δ 、 θ 等相在基体中存在大量位错等缺陷的条件下, 析出量及分布的弥散程度更好。因此铸造铝锂合金凝固冷却后一般需经均匀化退火处理, 以提高合金的综合力学性能。Al-Mg-Li 系铸造铝锂合金的均匀化退火过程是一个复杂的相变过程, 在均匀化退火完成后 $370\sim 260^\circ\text{C}$ 范围内析出的 S (Al_2MgLi) 相要消耗固溶在基体中的大量 Mg 和 Li 原子 (Al_2MgLi 相中 Al/Mg/Li 原子百分比为 46/23/31), 造成 S (Al_2MgLi) 相周边形成 PFZ 区域, 导致合金组织分布不均匀, 因此在完成均匀化退火后应立即进行空冷处理, 改善合金的力学性能^[28]。研究表明, 对铸造铝锂合金采用先低温长时间后高温短时间的分级时效热处理可以使析出相在低温阶段大量形核, 然后在高温阶段快速长大, 即可抑制晶界有害相的形成, 又能阻止粗大平衡相沿晶界析出和在晶界形成 PFZ 区域, 此外, 分级时效使合金中析出较多的 $\text{Al}_3\text{Li}/\text{Al}_3\text{Zr}$ 复合粒子, 改善铝锂合金的强韧性^[29], 同时采用分级时效时, 可使合金在低温阶段产生大量的沉淀相析出核心, 然后高温时效促进析出相的长大, 最终使均匀细小的析出相体积分数增加, 改善合金的韧性^[28]。哈尔滨工业大学的彭德林与陆政等针对 Al-2.8Li-1.2Cu-0.2Zr 铝锂合金采用 525°C 保温 1h 固溶淬火, 140°C 保温 5h、 170°C 保温 5h、 190°C 保温 8h 的分级时效热处理工艺使得该合金的抗拉强度达到了 400MPa, 屈服强度达到了 340MPa^[17]。铸造铝锂合金中由于 Li 的存在导致其他合金元素在合金中的固溶度随之下降, 铸造铝锂合金固溶温度可按式 (4) 计算推导^[16], 式中合金元素代表各元素所占的质量分数 ($\omega/\%$)。

$$T_{\text{固溶温度}} = [284 + 67.0 \times \text{Li} + 34.6 \times \text{Cu} + 36.5 \times \text{Mg}]^\circ\text{C} \quad (4)$$

铸造铝锂合金的各向异性经时效热处理后可得到一定消除。在时效之初至峰值时效前, δ' 相弥散细小分布, 位错运动难以绕过 δ' 相粒子, δ' 相被运动的位错切过, 易于诱发位错产生共面滑移, 将变形限制于几个可动的滑移面上, 导致变形不均匀产生各向异性。同时, 随着时效的进行, δ' 相的尺寸增大, 位错切过 δ' 相粒子的阻力增加, 加上由于粒子间距增加而引起位错绕过的增多, 从而减少了共面滑移, 使得合金的各向异性增幅逐渐减小, 当合金达到峰时效时, 各向异性达到最高值, 随着过时效的出现, δ' 相聚集粗化, 同时 δ' 相粒子间距变大, 位错易于绕过通行, 合金的各向异性随之不断下降^[30]。刘北兴研究指出铸造铝锂合金的抗电化学腐蚀性能随着固溶冷却速度的降低而不断增加, 降低固溶冷却速度, 可促使 δ' 相尺寸增加, 数量减少, 同时基体中的位错密度下降, 合金塑韧性得到提高^[31]。当固溶时间一定时, 随着固溶温度的升高 (或者当固溶温度一定时, 随着固溶时间的延长), 铸造铝锂合金中的析出相逐步溶入基体中, 镁、锂等溶质原子同时由晶内和晶界对向扩散, 使原来的无沉淀析出带 PFZ 窄化, 甚至完全消失^[14]; 晶间平衡相尺寸变小, 晶界连续性程度增加; 同时, 合金晶界强度逐渐提高, 使晶界得到强化, 从而提高合金组织的均匀程度^[32]。

3 发展趋势

铸造铝锂合金轻质、高强、高韧和高抗腐蚀等性能可使其在航空航天领域有着广泛的应用背景。近年来, 国外铸造铝锂合金在向着高强高韧、超轻质、高强可焊接、低各向异性、较高热稳定性等方向发展, 我国在铸造铝锂合金研制方面仍处于研究探索阶段, 尚未得到工业应用和批量生产, 未来我国的铸造铝锂合金研制需要重点关注铸造铝锂合金的合金系列设计、合金组织细化与杂质抑制、熔炼保护工艺与设备研制、精密凝固成形工艺与特种成形设备、精密热处理工艺等技术。

与变形铝锂合金不同, 铸造铝锂合金在成分制定及工艺规范上具有鲜明的特色, 除需满足一定的力学性能外, 铸造铝锂合金还必须具有比变形铝锂合金更好的熔铸性能及比传统铝合金更低的密度, 更大的比刚度、比强度; 因此在保持较高锂含量的前提下, 如何使铸造性能达到最佳, 对铸造铝锂合金至关重要。而锂、镁等活泼元素的添加将增加合金熔液与铸型的界面作用, 加大粘砂、氧化、裂纹等倾向, 为合金熔液的充型保护增加了困难, 总之, 如何协调铸造性能与低密度的矛盾是铸造铝锂合金研究的关键问题。铸造铝锂合金的熔铸、成形、焊接与热处理都是相当复杂的工艺制造技术, 我国铸造铝锂合金的研制与发展, 与美、俄还有 30 多年的差距, 应适当集中研究领域, 在已有基础上针对

一些具体型号任务开展研究,如减小合金各向异性、改善合金焊接性能、提高合金韧塑性能,降低制造成本以及研究、开发新型稀土铝锂合金、铝基铝锂合金复合材料,与此同时,要大力支持与产品设计和研制有关的铝锂合金的应用研究。

4 结束语

随着航空航天武器装备对轻质化、高寿命、高可靠性等技术指标要求的日益严格,铸造铝锂合金作为新型的航空航天材料,越来越受到人们的重视。随着近年来科研人员研究的深入和工艺、制造技术的进步,必将得到广泛的应用。目前我国在铸造铝锂合金的研究方面仍处于起步探索阶段,较为落后。未来我国在铸造铝锂合金研制方面需对先进成形工艺方法与技术进行有效集成与工程化管理,以研究院所及高校为基础理论研究中心,突破关键技术难点,加强厂所院校协作,充分发挥各自优势,加强成果转化。相信随着各方的关注、支持及努力,铸造铝锂合金的研究和应用必将迎来蓬勃发展。

参考文献:

- [1] 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. 2003,17(2):18-23.
- [2] 杨守杰, 陆政, 苏彬, 戴圣龙, 刘伯操, 颜鸣皋. 铝锂合金研究进展[J]. 材料工程. 2001(5):44-47.
- [3] 杨遇春. 铝-锂合金的发展现状和前景[J]. 轻合金加工技术. 1993,21(5):1-5.
- [4] 薛卫东, 张瑞明. 新型铝合金展望[J]. 机械工程与自动化. 2004,125(4):90-92.
- [5] 刘斌, 陈铮铮, 顾冰芳, 陆渝生, 姜剑红. 铝锂合金的发展与应用[J]. 现代机械. 2001,4:71-76.
- [6] Webster D. Aluminum Lithium[J]. Advanced Materials Process. 1984,94(5):18-24.
- [7] Arlene Ebersperger PM, Christian Moscoso. The lithium industry Its recent evolution and future prospects[J]. Resources Policy. 2005,30:218-231.
- [8] 霍红庆, 郝维新, 耿桂宏, 达道安. 航天轻型结构材料铝锂合金的发展[J]. 真空与低温. 2005,11(2):63-69.
- [9] R.K.Gupta, Niraj Nayan, G. Nagasireesha, S.C. Sharma. Development and characterization of Al-Li alloys[J]. Materials Science and Engineering A. 2006,420:228-234.
- [10] 彭德林, 陆政, 闵光辉, 安阁英. 铝锂合金铸件的研究现状[J]. 特种铸造及有色合金. 1992,1:21-23.
- [11] 韩建德, 王常春, 闵光辉, 陆政, 彭德林. 铸造 AlLiCu 合金的组织与性能[J]. 铸造技术. 2002,23(4):245-247.
- [12] 彭德林, 陆政, 安阁英, 周彼德. 铝对 Al-Li-Cu 铸造合金组织及性能的影响[J]. 铸造. 1992(7):23-26.
- [13] 高洪林, 吴国元. Al-Li 合金的研究进展[J]. 材料导报. 2007,21(6):87-90.
- [14] 陈飏, 赵平. 铸造铝锂合金热处理工艺的研究[J]. 铸造. 2006,55(2):132-134.
- [15] 周昌荣, 潘青林, 朱朝明, 何运斌, 尹志民. 新型铝锂合金的研究和发展[J]. 材料导报. 2004,18(5):30-32.
- [16] 彭德林, 安阁英. 定向凝固 AlAlLi 共晶生长演化机制[J]. 特种铸造及有色合金. 2002(1):1-3.
- [17] 李锡武. 1420 铝锂合金力学性能的各向异性[J]. 稀有金属. 2004,28(1):151-154.
- [18] 张荣霞, 曾元松. 铝锂合金的发展、工艺特性及国外应用现状[J]. 航空制造技术. 2007,2:438-441.
- [19] 蒋筑君, 吴世钊. 含锂铝合金熔炼铸造时的保护[J]. 中国有色金属学报. 1995,5(1):90-92.
- [20] 邱占疆, 王承志, 郝博, 孟宪嘉. 快速凝固 AlLi 合金的性能与显微结构研究[J]. 铸造设备研究. 2000,1:36.
- [21] 刘欣, 王国庆, 李曙光, 刘琦. 重型运载火箭关键制造技术发展展望[J]. 航天制造技术. 2013,1:1-6.
- [22] 黄兰萍, 郑子樵, 李世晨, 蒋呐, 范云强. 铝锂合金的研究与应用[J]. 材料导报. 2002,16(5):20-26.
- [23] 安阁英, 闵光辉, 彭德林, 周彼德. 铝锂合金的熔化和铸造工艺[J]. 铸造. 1984,2(1).
- [24] 徐国栋. 铝锂合金的合金化及作用[J]. 科技创新导报. 2011,24:88.
- [25] 彭德林, 闵光辉, 安阁英, 陆政. 铸造铝锂合金凝固过程及形成的组织的研究[J]. 材料科学与工艺. 1994,2(2):60-64.
- [26] 王芝秀, 郑子樵, 李海. 铝锂合金的微合金化及其作用机理[J]. 材料导报. 2003,17(10):11-18.
- [27] 曾迎, 蒋斌, 李瑞红, 刘玉虹. 合金元素对 Mg-Li 合金组织及性能的影响[J]. 铸造. 2012,61(3):275-278.
- [28] 郑子樵, 张纬斌, 崔祺, 宋士泓. Al-Li 合金的熔炼铸造和热处理[J]. 轻合金加工技术. 1982,3(2):1-7.
- [29] 黄杰, 蒲强亨 范谢罗. 1420 铝锂合金 DC 铸造的常见缺陷[J]. 特种铸造及有色合金. 2000,2(20):25-27.

- [30] 范云强, 沈健. 均热冷却方式对 1420 合金铸锭组织和性能的影响[J]. 轻合金加工技术. 2005,33(7):15-17.
- [31] 刘北兴, 李国爱. 固溶处理冷却速度对 1420 合金性能的影响[J]. 材料科学与工艺. 2004,12(6):583-585.
- [32] 陈飏. 铸造 AlLiCuMgZr 系合金热处理工艺的研究[D]. 成都: 西华大学; 2006.