

• 今日铸造 Today Foundry •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5033

高性能大型铝合金铸造技术现状及展望

刘琦¹, 王军¹, 张海涛², 殷凤杰³, 王强², 王飞²

(1. 西北工业大学凝固技术全国重点实验室, 陕西 西安 710072; 2. 天津航天长征技术装备有限公司, 天津 300301; 3. 首都航天机械有限公司, 北京 100071)

摘要: 铝合金材料在航空航天领域占据重要地位, 且航空航天铸件朝着精密、薄壁轻质化、结构一体化及高性能方向发展。了解并掌握大型铝合金复杂产品制造技术至关重要。铸造工艺在大型复杂薄壁产品领域具有明显优势, 本文系统梳理了大型复杂铝合金铸件生产中的瓶颈问题, 并归纳了大型铝合金铸件国内外研究现状。从铸件材料、熔体处理、热处理、组织调控及铸造生产装备等方面总结分析了其研究现状, 为高性能、高精度大型铝合金铸件的开发及应用提供相应的解决思路。针对未来大型铝合金复杂铸件制造技术的发展, 从现有应用材料和新型高强铝合金的角度出发进行了展望。

关键词: 铝合金; 大型复杂铸件; 铸造工艺; 熔体处理; 组织调控; 铸造装备

中图分类号: TG292

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)12-1236-13

Status and Prospects of High-performance Large Aluminium Alloy Casting Technology

LIU Qi¹, WANG Jun¹, ZHANG Haitao², YIN Fengjie³, WANG Qiang², WANG Fei²

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Tianjin Aerospace Long March Technology and Equipment Co., Ltd., Tianjin 300301, China; 3. Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100071, China)

Abstract: Aluminium alloy materials occupy an important position in the aerospace field, and aerospace castings are developing into precision, thin-walled and lightweight materials with structural integration trends and high performance. Therefore, it is crucial to understand and master the manufacturing technology of large-scale aluminium alloy complex products. The casting process method has obvious advantages in the field of large-scale complex thin-walled products; on this basis, this paper systematically addresses the bottleneck problems of large-scale complex aluminium alloy castings in production and summarizes the current status of domestic and international research on large-scale aluminium alloy castings. With respect to the casting materials, melt treatment, heat treatment, microstructure regulation and casting production equipment and other levels of summary analysis of the current research situation for the development of high-performance, high-precision large aluminium alloy castings and applications can provide corresponding solutions. Finally, for the future development of large-scale aluminium alloy complex casting manufacturing technology, from the perspective of existing applied materials and new high-strength aluminium alloys, an outlook is presented.

Key words: Al alloy; large and complex castings; casting process; melt treatment; microstructure control; casting equipment

随着航空航天产品向着精密化、整体化、轻质化、高性能、低成本及短周期的方向快速发展, 整体精密成形构件的应用日益广泛。铝合金作为一种成熟的合金, 因其轻量化、耐高温、耐腐蚀等性能^[1-3], 成

为该领域的首选材料体系之一^[4-7]。

铸造工艺采用液态成形法, 在成形大型、复杂、薄壁构件方面, 具有不可替代的优势, 尤其在采用近净成形的铝合金铸件中非常明显^[8], 具有以下特点:

收稿日期: 2025-03-04

基金项目: 国家科技重大专项(2025ZD0618602)

作者简介: 刘琦, 1984年生, 硕士, 高工。研究方向为轻合金先进成形与性能调控技术。Email: 1195053955@qq.com

通信作者: 王飞, 1996年生, 硕士, 工程师。主要从事轻合金铸造成形及腐蚀防护技术。Email: 18822028669@163.com

引用格式: 刘琦, 王军, 张海涛, 殷凤杰, 王强, 王飞. 高性能大型铝合金铸造技术现状及展望[J]. 铸造技术, 2025, 46(12): 1236-1248.

LIU Q, WANG J, ZHANG H T, YIN F J, WANG Q, WANG F. Status and prospects of high-performance large aluminium alloy casting technology[J]. Foundry Technology, 2025, 46(12): 1236-1248.

①采用铝合金构件整体铸造成形代替多个零件组合成形,显著提高了产品的整体精度和刚度;②一些复杂铸件内部结构空间复杂,内腔加工难度大,甚至有一些区域需要采用精密铸造成型工艺;③将铸造成形的材料利用率提高至60%~90%,不仅显著减少机械加工量、降低成本,而且缩短生产周期。目前采用铸造工艺生产的国内典型高性能铝合金铸件,其尺寸轮廓范围涵盖400~2 500 mm,在航空航天领域应用较为广泛^[9-11]。

然而,随着航空航天技术的跨越式发展,对高性能和高精度铝合金大型复杂铸件的需求也越来越多。为了推动我国先进大型铝合金复杂铸件制造技术发展,本文总结了国内外大型复杂铝合金铸件研制过程中的瓶颈及成果,旨在为高性能、高精度铸造铝合金的开发与应用提供思路。

1 大型铝合金铸件生产问题及瓶颈

中小型、简单回转体类铝合金铸件的研制难度较低,铸件本体力学性能、内部质量及尺寸精度控制较为成熟。然而随着铸件性能要求的进一步提高,大量采用异形薄壁复杂结构设计,且轮廓尺寸均在2 000 mm以上,产品内部质量要求达到QJ 3185A-2018 I类,本体力学性能达到QJ 3185A-2018 II级以上,控制难度较大,同时铸件尺寸精度不低于CT8级。目前国内大型铝合金铸件大多采用砂型反重力铸造方法,本部分针对此类大型铝合金复杂铸件生产存在的几个问题进行了归纳。

1.1 产品尺寸精度控制难度大

砂型铸造大型铸件尺寸精度在CT10~CT12级,与CT8级要求存在较大差距。在成形典型大型复杂薄壁精密铸件方面存在以下难点:①轮廓尺寸2 000 mm左右大型铸件,模具制造、铸型组合、热处理等关键工序的尺寸累积公差较大;②铸件内腔结构复杂,分布着凸台、筋条等结构,造成铸件内腔热节复杂,构件铸造凝固过程受阻收缩不一致,而现阶段收缩率设计依靠经验判断,很难保证一次合格,往往需要多次调整铸造模具尺寸进行生产实践验证,但现有的铸造水平仍无法达到尺寸精度要求。

1.2 内部质量控制难度大

现有铸造工艺条件下大型铝合金复杂铸件内部质量可达到QJ 3185A-2018 II类,因结构复杂程度及铸造工艺水平限制,内部质量难以达到QJ 3185A-2018 I类要求,主要是:①复杂铸件内腔分布着凸台、筋条等结构,造成铸件内腔热节复杂,各部位形状及壁厚差异大,部分局部区域的薄壁与厚壁壁厚差达

到1:5以上,壁厚相差悬殊,热节区域多,造成内部质量控制难度大;②精密成型铸件内腔大部分位置为非加工面,且一些狭小位置存在加工盲区,造成冷却系统设计存在一定局限性,凝固顺序调整困难较大;③采用Al-Cu系合金的复杂铸件,因Al-Cu系合金结晶温度范围宽,呈糊状方式凝固,合金铸造性能差,易产生铸造缺陷。同时复杂薄壁结构限制了铸造工艺措施的实施,增加了铸件内部质量的控制难度。

1.3 大型铝合金复杂铸件本体力学性能控制难度大

部分复杂薄壁铸件为实现良好的充填,采用Al-Si系合金,如ZL114A。虽然目前复杂薄壁铸件ZL114A本体性能指标平均值可以达到 $R_m \geq 300 \sim 320 \text{ MPa}$ 、 $R_{p0.2} \geq 240 \sim 260 \text{ MPa}$ 、 $A \geq 3\% \sim 6\%$,但还无法使其稳定达到II级性能要求,即 $R_m \geq 320 \text{ MPa}$ 、 $R_{p0.2} \geq 280 \text{ MPa}$ 、 $A \geq 4.5\%$ 。

ZL114A合金熔体处理中的变质细化和铸造过程凝固速率对组织性能影响较大,而大型铝合金复杂铸件内腔复杂热节多,结构限制冷却系统设置,造成局部位置晶粒粗大,降低力学性能,薄壁区和厚壁区域力学性能相差较大,通常采用砂型铸造工艺。图1为不同过冷度下Al-Si合金组织的变化情况^[4]。在不同过冷度条件、流动场和温度场作用下,合金组织相差明显,而在实际铸造过程中合金成分含量高低、铸件壁厚差异、冷却系统设置都会影响铸件的凝固顺序。图2为生产某型号大型铝合金复杂铸件时产品不同区域组织差异情况,可以看到铸件不同位置、不同壁厚的组织截然不同,导致整体组织均匀性差异较大,从而降低铸件的本体性能。另外,现有ZL114A合金元素配比较为宽泛,且大熔体晶粒细化工艺不够成熟,造成ZL114A材料铸件力学性能控制难度大。

2 大型复杂铝合金铸件国内外应用现状

复杂薄壁铝合金精密铸件经常使用的铸造方法包括砂型铸造和熔模铸造(陶瓷型、石膏型)。美国Hitchcock公司采用砂型铸造生产了635 mm×1 650 mm、质量为106 kg的大型优质铝合金近净形铸件;Wellman公司则采用低压铸造方法进行此项铸件的批量生产。两种方法生产的铸件内部质量均达到了美军标Mil-21180 B级要求。图3是CFI公司80年代生产的当时被称之为最大的铝合金炮塔铸件,该公司是世界上擅长生产大型铝合金铸件的专业公司之一,铸件高1.828 8 m,底盘直径1.905 m,质量约为566.99 kg。

随着铝合金铸造技术的发展和大型低压差压铸装备的开发应用,目前中国航天科技集团、沈阳铸造

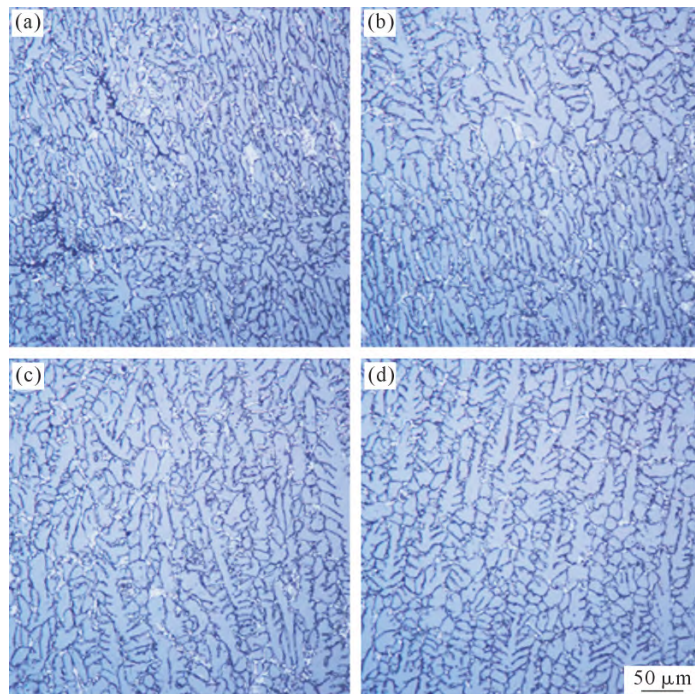


图1 不同过冷度下 Al-Si 合金凝固组织变化:(a) 20 °C; (b) 10 °C; (c) 8 °C; (d) 1 °C^[12]

Fig.1 Changes in the solidification microstructure of Al-Si alloys under different degrees of cooling: (a) 20 °C; (b) 10 °C; (c) 8 °C; (d) 1 °C^[12]

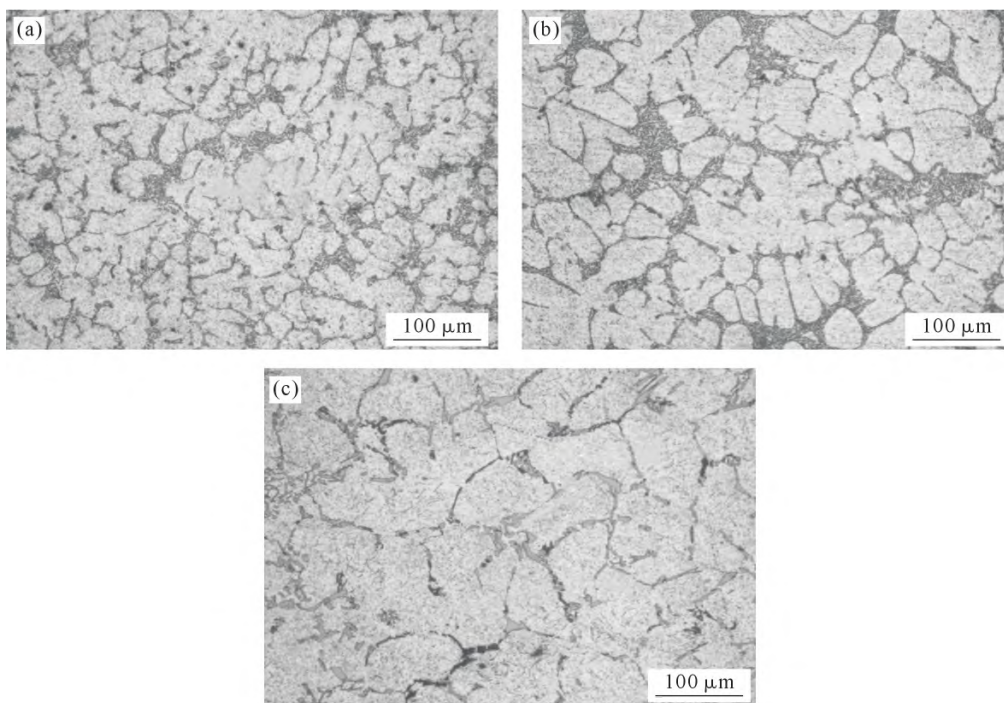
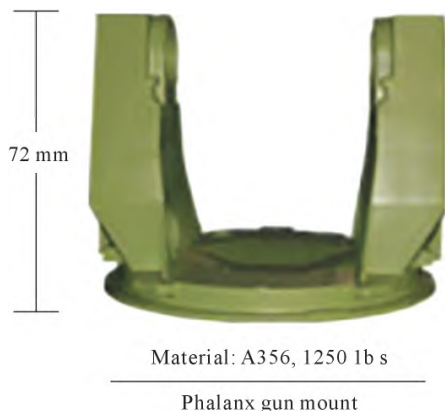


图2 铸件不同区域组织差异情况:(a) 薄壁区域;(b) 端框区域;(c) 厚大区域

Fig.2 Differences in microstructure in different regions of castings: (a) thin-walled area; (b) end frame flange area; (c) thick large area

研究所、中国船舶重工集团等均具备大型铝合金铸件砂型铸造能力。中国航天科技集团、中国船舶重工集团采用砂型铸造工艺,实现了轮廓 2 500 mm 左右铝合金壳体近净形铸造,壁厚尺寸精度由 GB/T 6414-1999 CT12 级提高到 CT10 级,内部质量达到 II 类,本体性能达到 III 级要求。虽然砂型铸造工艺可成形大型铸件,但砂型铸造的铸件尺寸精度难以提升。

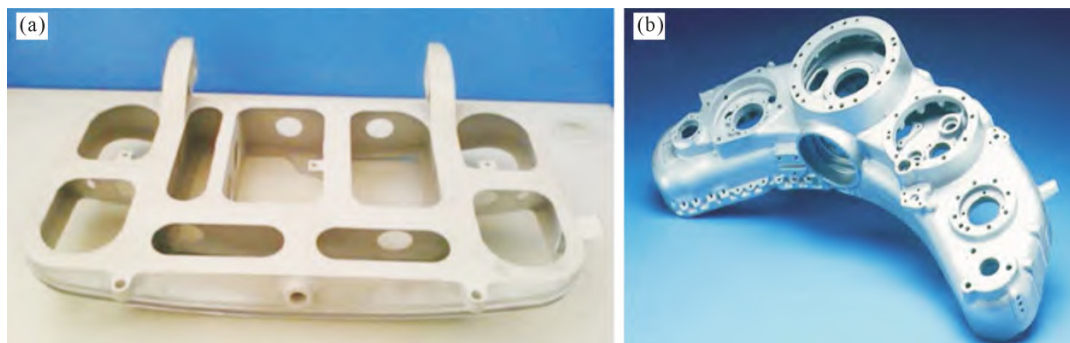
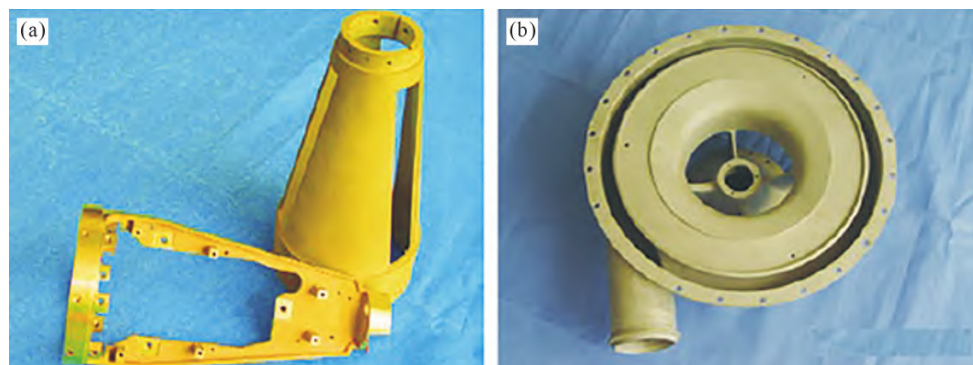
熔模精密铸造方面,欧美日等发达国家都在不断地开展熔模精密铸造新工艺、新材料的研发设计与应用,并形成了完善的成形理论基础^[13]。国外较早利用型壳法就能生产尺寸较大(尺寸可以达到 1 000 mm)的航空航天及军工用大型薄壁整体结构铝合金壳体精密铸件,铸造精度高、结构复杂、性能优异,显著提高了铸件的服役寿命、整体结构刚度,缩短了生产周期,使产品更加轻量化,加快了航天军工型号产品的

图3 国外大型铝合金铸件^[13]Fig.3 Large Al alloy castings abroad^[13]

生产研制与应用。目前,国外在航空航天和军工装备等领域主要使用熔模精密铸造工艺生产铝镁合金产品,例如美国战斧巡航导弹和 BAT 导弹等导弹壳体^[14]。美国 Tec-Cast 公司运用此技术为波音 767 飞机铸造了发动机上的燃油增压泵壳体,该铸件外形复杂,内部有多个变截面的弯曲油路歧管,并要求很高的气密性以防止高压时漏油,中心孔距离要求保持在 ± 0.25 mm,由多个加工件组合而成,制造周期长、成本高。该公司采用 22 个分体蜡模组合成一个整体蜡模,在组合时埋嵌 12 个不同形状及尺寸的型芯,与石膏型精密铸造法配用,铸造出 A356 铝合金整体精铸件予以代替,取得了简化加工、节省设备、

缩短周期、大幅降低成本和提高使用性能的效果。另外还有国外导弹武器型号中的转轮、喷气罩、悬挂拨叉,以及航天零部件中的转轮、增压泵、增压泵护圈等型产品使用此类铸造工艺^[15]。美军 F-16、F-18、F-22、F-35 型战斗机上大量采用了铝合金精密铸件,鹰眼 E-2C 预警机的舱门、襟翼、电子仪器舱壳等部件也广泛选用铝合金精密铸件。如图 4 为采用熔模精密铸造生产的波音 737-AD 舱门铸件和航空发动机的镁合金机匣精密铸件。

随着我国航空航天事业的发展,精密结构件的需求越来越大,熔模精密铸造也迎来了快速推进阶段。中北大学与兵器七〇所、兵器六一六厂等运用石膏型熔模精密技术成功试制技术条件要求高、工艺难度大的光学仪器罩壳(国外引进)和多种波导管零件,以及具有四维或五维空间尺寸的整体铝合金开式和闭式叶轮等^[16-17]。某电子壳体铝合金产品采用精密铸造技术生产,外形尺寸为 98 mm×160 mm,平均壁厚为 5 mm(图 5a)。图 5b 为蜗壳铝合金精密铸件,采用陶瓷型壳制造,外形尺寸为 320 mm×250 mm,平均壁厚为 3 mm。另外,西北工业大学采用高压铸造工艺生产的某薄壁框架类结构,外形尺寸为 2 930 mm×1 250 mm、高 420 mm,材料为 ZL114A。由于铸件大、壁薄,金属液完整充型比较困难,采用高压充型并设计合适的浇注系统和工艺参数保证铸

图4 典型镁合金产品:(a) 波音 737-AD 舱门铸件;(b) 镁合金机匣^[15]Fig.4 Typical magnesium alloy products: (a) Boeing 737-AD cabin door casting; (b) Mg alloy casing^[15]图5 铝合金精密铸件:(a) 电子壳体铝合金精密铸件;(b) 蜗壳铝合金精密铸件^[16-17]Fig.5 Aluminium alloy precision casting products: (a) Al alloy precision casting for electronic shells; (b) volute Al alloy precision casting^[16-17]

件质量。

铝合金薄壁铸件的制备中采用陶瓷型和石膏型熔模精密铸造方法的应用较为广泛,并且得到的铸件具有较高的表面质量和尺寸精度,但熔模铸造型壳或铸型的导热性差,又因为是热型浇注,某些合金的结晶间隔宽,使得合金液浇注后,结晶凝固时间长,铸件产生气孔、针孔、疏松、缩孔的倾向大,铸件内存在组织致密度和力学性能较低的问题。单一铸造方法难以达到现有砂型内部质量 II 类及力学性能 III 级的要求,制约了熔模精密铸造工艺在多层复杂结构的整体结构件、大型整体铝合金结构件和高性能铝合金结构件整体铸造方面的应用。

为解决高性能复杂铸件整体铸造问题,我国也开展了相关研究。例如,北京航空材料研究院的熊艳才研究员采用熔模铸造型壳与金属型或树脂砂型复合工艺,完成了铝合金精密铸件的生产^[18-20]。采用熔模精密铸造与金属型复合铸型成功实现了叶片厚度仅为 1.5 mm,流道和叶片无余量设计的某型发动机铝合金叶轮铸件的一次性完整成形;采用熔模精密铸造与树脂砂复合铸型成功浇铸了 GE 某型燃气轮机用叶轮铸件,实现了壁厚为 1.2 mm 叶轮轮尖部位的整体成形,如图 6 所示。图 7 为某型电子仪表壳体熔模精密铸件结构示意图。直径为 390 mm,高 440 mm,两侧散热片长 275 mm、宽 3 mm,间距为 6 mm,沿壳体外侧均匀分布,总数量为 26,为典型的结构功能一体化复杂铝合金精密件,为了实现整



图 6 发动机叶轮
Fig.6 Engine impeller

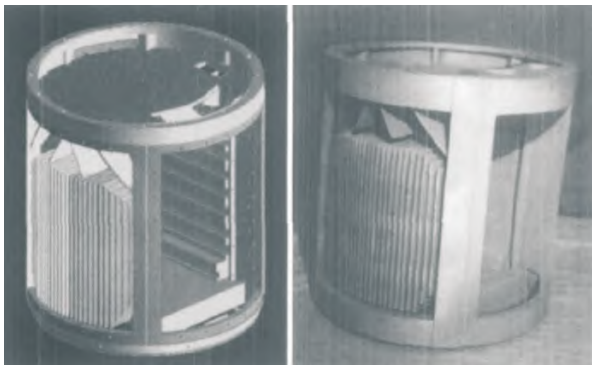


图 7 电子仪表壳体铸件^[20]
Fig.7 Electronic instrument shell casting^[20]

体结构成形并确保内部冶金质量,熊艳才^[20]采用树脂砂型与熔模精密壳型的复合铸型,既保证了铸件整体成形,又确保了铸件内部质量。

3 大型复杂铝合金铸造技术研究现状

3.1 铸造铝合金材料

目前大型铝合金铸件常用材料为 Al-Si 系、Al-Cu 系合金。ZL114A 是铸造 Al-Si 合金中的重要分支,大量应用于航天装备上承受高负荷的零件^[21]。ZL114A 合金中含有较高含量的 Mg (0.4%~0.7%),凝固时形成 Mg_2Si 相,通过热处理实现其固溶强化和沉淀强化^[21]。国外与之相近的合金牌号为 A357 (美国军标,Al-7Si-0.6Mg)合金,其砂型铸件本体性能抗拉强度可以达到 360 MPa,伸长率大于 6%,而我国许多航空航天企业生产的 ZL114A 合金砂型铸件内外放置冷铁的抗拉强度 320 MPa,伸长率 4%,与国外还具有一定的差距^[22-25]。当铸件结构复杂,壁厚差异大,或铸件轮廓尺寸特别大,难以保证合理的凝固顺序时,铸件极易出现组织粗大和疏松缺陷,强度和伸长率大幅下降,各部性能差异较大,从而导致铸件本体力学性能无法达到指标要求。为提高 ZL114A 合金的力学性能,不仅从铸造工艺顺序凝固设计,还要在优化合金成分、熔体精炼、变质和微合金化上开展更多研究,探索最优化的 ZL114A 合金成分,规范精炼、变质和微合金化工艺,改善 ZL114A 合金组织、提高力学性能,满足结构铸件综合性能的要求。

高强铸造铝合金主要是以 Al-Cu 为主的 2 系合金^[26],复杂的 Al-Cu 合金主要分为高强度铸造铝铜合金和耐热铸造铝铜合金两大类。高强度铸造铝铜合金有 ZL201、ZL201A、ZL204A、ZL205A、ZL209A 和美国的 A2010(KO-1)、2060 及俄罗斯的 BAl10 等。ZL201 合金是在 ZL203 合金的基础上加入 Mn 和 Ti 获得的,再提高其纯度,减少 Fe 和 Si 等杂质含量便可获得 ZL201A 合金;在 ZL201A 合金的基础上加入 Cd 可获得 ZL204A 合金;再加入微量的 Zr、V、B 便得到 ZL205A 合金;在 ZL205A 合金基础上加入少量 RE,并采用低纯度原材料即获得 ZL209 合金。

近些年,国内高强韧铸造铝合金领域取得了一定的成绩。60~70 年代,某研究院研制了 ZL205A 合金,其含有 Cu、Mn、Zr、V、Cd、Ti、B 等 7 种合金化元素。ZL205A(T6)抗拉强度为 490 MPa,是目前强度最高的铸造铝合金。ZL205A(T5)强韧性最好,伸长率可达 10%,但强度偏低,这是因为 ZL205A 合金采用高纯度原材料并添加 Ti、Zr、V、B 等多种微量合金强化元素细化晶粒,添加 Cd 控制时效进程,并配合严

格的热处理工艺而制得。常规 ZL205A 高强铸造铝合金与国外同类铸造合金室温力学性能如表 1 所示,目前该合金已被纳入部标、国标,成为军品、承力重要民品的结构材料。

由此可见,ZL205A 合金无疑是高强韧铸造铝合金的首选合金,但由于铸造工艺性差,疏松、偏析等缺陷倾向严重等,限制其在大型复杂薄壁构件中的应用。现有合金性能无法满足型号对高性能高承载构件的需求,亟需进一步优化合金配比、熔体均匀化处理和铸造工艺等,提高铸件整体力学性能。

近些年来,随着航空航天部分装备构件对轻量化机高刚度的要求越来越高,逐步开始应用铝锂合

金。但与变形铝锂合金相比,铸造铝锂合金不存在各向异性问题,Li 含量可更高,因而合金密度更低,一些零件如大型复杂薄壁铸件难以通过变形加工的方式成形,进行铸造铝锂合金的开发研究将进一步扩大其应用范围。铝锂合金具有密度低、比强度、比刚度高等特点,其刚度为传统轻质镁、铝合金的 1.3 倍以上,密度低可实现结构减重 10%~20%,因此 Al-Li 合金作为轻量化高承载结构材料具有较大的技术经济意义,可部分替代现有的 2xxx、7xxx 铝合金,成为新一代航空航天结构材料,也是复合材料的有力竞争对手。国内外几种铸造 Al-Li 合金及其性能见表 2~6。

表1 ZL205A高强铸造铝合金与国外同类铸造合金室温力学性能

Tab.1 Room-temperature mechanical properties of ZL205A high-strength cast Al alloys and similar cast alloys

Alloy	Country	Casting method	Heat treatment condition	R_m/MPa	$A/\%$
ZL205A	China	S	T5	≥ 440	7.0
BAJ114	Russia	S	T5	≥ 400	7.0
ZL205A	China	S	T6	≥ 490	3.0
KO-1	USA	S	T6	≥ 420	5.0
BAJ114	Russia	S	T6	≥ 430	4.0

表 2 8090 铝锂合金化学成分

Tab.2 Chemical composition of the 8090 Al-Li alloy

(mass fraction/%)

Li	Mg	Cu	Zr	Fe	Si	Zn	Mn	Cr	Ti	Al
2.2~2.7	0.6~1.3	1.0~1.6	0.04~0.16	0.3	0.2	0.25	0.1	0.1	0.1	Bal.

表 3 8090 铝锂合金物理及力学性能

Tab.3 Physical and mechanical properties of the 8090 Al-Li alloy

Density/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	Modulus of elasticity $/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	Coefficient of thermal expansion $(20\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}^{-1})$	Thermal conductivity $(40\text{ }^{\circ}\text{C})/(\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	Resistance $/(\mu\Omega\cdot\text{cm})$	R_m/MPa
2.55~2.56	81 000	22×10^{-6}	0.80	10.4	480~550

表 4 金属型铸造 Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.2Sc-0.2Zr 物理及力学性能

Tab.4 Physical and mechanical properties of the metal mold casting Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.2Sc-0.2Zr alloy

Density/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	Modulus of elasticity $/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	R_m/MPa	$A/\%$
2.7	79	480	6

表 5 砂型铸造 Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.2Sc-0.2Zr 物理及力学性能

Tab.5 Physical and mechanical properties of the sand casting Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.2Sc-0.2Zr alloy

Density $/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	Modulus of elasticity $/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	R_m/MPa	$A/\%$
2.7	79	458	4.1

表 6 铸造 Al-4Cu-2Li 合金成分及力学性能

Tab.6 Composition and mechanical properties of the cast Al-4Cu-2Li alloy

Li	Cu	Zr	Cd	Al	$R_{0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$
1.26	4.62	0.17	-	Bal.	350~491	443~573	12.1~12.5
1.16	4.17	0.15	0.275	Bal.	469~560	545~616	7.2~12.6

当前,针对铝锂合金的研究主要集中于变形铝锂合金,而铸造铝锂合金的熔炼工艺、热处理工艺、组织细化及缺陷控制等需进一步研究。由于 Li 非常活泼,大气环境下熔炼易氧化、偏析造成夹渣;真空条件下熔炼,Li 易挥发造成含量不准,且 Li、Mg 等元素的加入使合金熔体与铸型界面作用增大,增加了粘砂、氧化、裂纹等缺陷的产生。因此,含 Li 的 Al-Cu 合金制备工艺复杂,冶金质量稳定性差,如何进一步提高 Al-Li 合金的综合性能是研究重点,也是当务之急。

为了解决以上问题,常用的工业化生产方法有真空熔炼或高纯惰性气体保护法、快速凝固法、粉末冶金法,通过在真空下熔炼,缩短凝固时间,降低反应温度的方式尽可能减少含 Li 氧化物的产生,降低 Li 元素的损失^[27-28];此外,针对熔炼铝锂用坩埚或炉底材料应避免使用含有 Al_2O_3 、 SiO_2 等容易与 Li 反应产生氧化物的材料,同时减少坩埚与熔体的接

触面积^[29]。近年来,针对 Li 元素的稳定性控制出现了一些新的研究思路,例如采用“低真空熔炼”与“旋转除气精炼”相结合的熔炼新技术^[30]。与传统的“熔剂+吹气保护”熔炼法不同的是,此方法能够弥补非真空条件下铝锂合金旋转喷吹出气效果差、除气时间长的缺点,同时低真空条件下也可避免铝锂合金的烧损问题,在低空熔炼过程中实现除气除渣。研究表明,采用外场(如超声波、电磁波)等辅助技术处理铝锂合金熔体,可显著细化晶粒并改善成分偏析^[30]。

3.2 熔体处理工艺

大型复杂铝合金铸件由于熔炼量大,熔体处理时间长,熔体的质量直接关系到铸件质量。虽然现在对铝合金进行了诸多研究,但就实际工程应用来讲,铸件与材料在使用性能方面仍存在较大差距。

3.2.1 熔体净化

铝合金在熔炼过程中,熔体中常会有气体、夹杂物及其他金属杂质元素的存在,这会导致铸件产生缩松、缩孔、裂纹、气孔等缺陷,严重影响铸件性能。因此,熔体净化非常重要。在工程中常用的铝合金熔体净化方法主要为吸附净化(化学方法)和非吸附净化(物理方法)^[27]。

吸附净化处理中普遍采用旋转喷吹熔剂法,在旋转喷吹除气的同时加入熔剂,达到除气、除杂质的目的,其工作原理如图 8 所示^[31]。蒋海燕等^[32]提出了一种名为旋转脉冲喷吹的除气新工艺,旨在使喷出的气泡达到微米级。采用脉冲进气的方式,使喷入的气泡更加细小。倪红军等^[33-34]研制出了铝合金熔体旋转喷吹除气净化设备,提出转杆内部安装一条进气管道,降低管道内温度,有效防止喷射熔剂因高温变软堵塞喷头。同时,提出了铝合金熔体净化新理论——铝合金熔体覆盖保护和化学净化原理,是采用能够析出净化原子的覆盖保护和化学净化熔剂,在原子除氢时,不会受到分子除氢过程中气泡大小对除氢效率的影响^[35]。

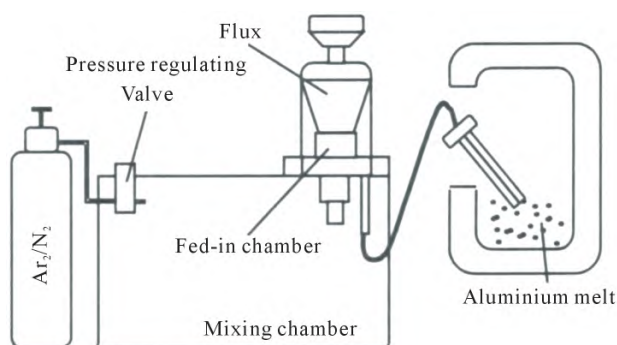


图 8 熔剂喷射装置示意图^[31]

Fig.8 Schematic diagram of the flux injection device^[31]

在非吸附净化领域,超声处理是 20 世纪 90 年代发展起来的一种新型的铝合金熔体净化方法。这种方法是利用超声波在熔体中的空化作用,超声波弹性振荡使得气泡的结晶核心形成,促使气泡聚集到一定尺寸析出。许广济等^[36]和 Shu 等^[37]采用高频交变磁场对铝合金熔体的净化工艺进行了理论和实验研究,发现高频交变磁场能使 $6\text{ }\mu\text{m}$ Al_2O_3 夹杂物的分离率超过 95%,且方形分离器通道的分离效率要比圆形的高。Zhang 等^[38]对铝熔体连续交流磁场净化工艺研究发现,当电流密度为 400 A/cm^2 时仅需 10s 就可以除去铝合金熔体中 95% 的夹杂物。

当前铝熔体净化技术吸附净化、非吸附净化等方法,可使夹杂物净化效果控制在 μm 级,但氢含量只能达到 $0.1\text{ mL}/100\text{ g Al}$,也限制了铝合金材料的性能提升和内部质量控制,熔体高纯度净化处理是进一步提升大型铝合金铸件性能的关键途径。

3.2.2 熔体孕育处理

铝合金熔体孕育处理主要为晶粒细化和变质处理。应用最广的晶粒细化剂为 Al-Ti-B 或 Al-Ti-C 中间合金,尽管在使用过程中具有不可避免的劣势^[39],但是其细化效果仍然不可忽视^[40]。

对铸造铝合金而言,变质处理可以有效改善合金组织,提高综合性能。例如,Al-Si 系合金中粗大的共晶硅相呈树枝状,对 $\alpha\text{-Al}$ 基体产生割裂作用,会极大地降低合金性能,研究表明 Sr 变质可以有效细化共晶硅,提高合金力学性能^[41-42]。在 Al-Cu 系合金中添加 Yb^[43-44]、Ce^[45]、Er^[46]、La^[47]、Pr^[48]等稀土元素,可以提高合金中析出相的稳定性并形成析出强化相,从而增强 Al-Cu 系合金的室温和高温性能,如图 9 和 10 所示。

章爱生等^[49]研究了不同成分和含量 Al-Ti-B 细化剂对 A357 合金组织的影响,结果表明,当合金中添加细化剂后其组织明显比未细化合金的尺寸更加细小,并且随着细化剂添加量的增加,合金的晶粒细化效果越明显。添加 1.5% 的 Al-5Ti-1B 或 Al-3Ti-3B 中间合金,细化效果最好,且 Al-3Ti-3B 中间合金细化效果要优于 Al-5Ti-1B,如图 11 所示。

3.2.3 熔体均匀化

Al-Cu 系具有合金化程度高、凝固区间宽、偏析严重等特性,若熔体处理不均匀,容易在直接铸造成形的铸件中存在热裂、缩松及缩孔等缺陷,尤其是偏析问题^[50-52]。因此,在 Al-Cu 系合金熔炼过程中,保证熔体成分的均匀性至关重要。

目前大型铝合金铸件熔体处理均匀性主要采用人工搅拌处理,为了实现机械自动化的均匀化工艺,国内外针对该问题也开展了相关研究。何敏等^[53]研

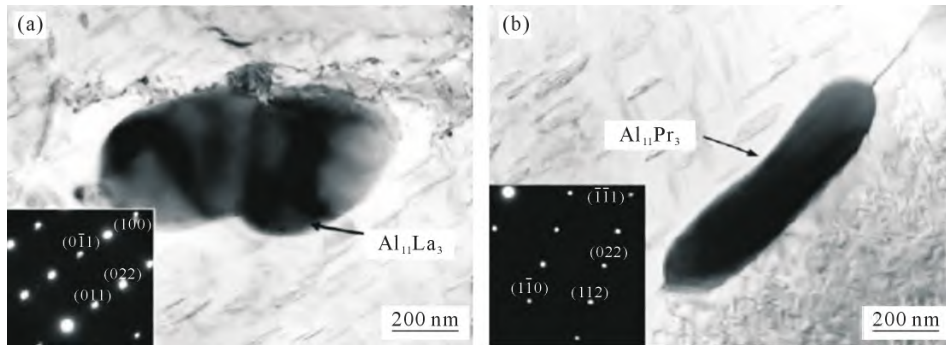


图9 Al-Cu合金中添加La和Pr后形成的析出相:(a) $\text{Al}_{11}\text{La}_3$, TEM像;(b) $\text{Al}_{11}\text{Pr}_3$, TEM像^[47-48]

Fig.9 Precipitation phases formed by the addition of La and Pr to Al-Cu alloys: (a) $\text{Al}_{11}\text{La}_3$, TEM images; (b) $\text{Al}_{11}\text{Pr}_3$, TEM images^[47-48]

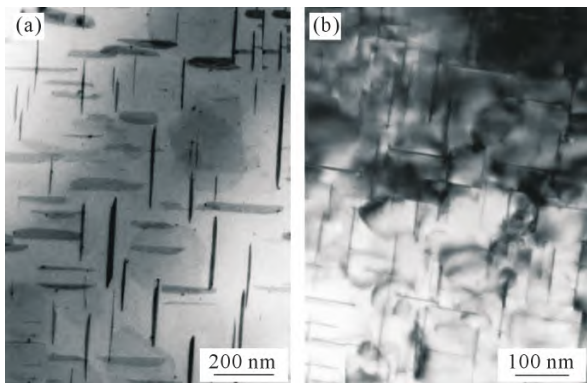


图10 ZL205A合金TEM形貌:(a)未变质;(b)0.3%的La变质^[48]

Fig.10 TEM morphology of the ZL205A alloy: (a) unmodified; (b) modified with 0.3 wt.% La^[48]

究表明,脉冲超声工艺对ZL205A合金的微观组织和偏析现象有显著影响。随着脉冲超声功率、施振时间、脉冲超声频率不断增大,ZL205A合金的组织由开始的细小圆整转变为粗大且不规则,最佳脉冲超

声工艺为脉冲超声功率1200 W、施振时间120 s、脉冲超声频率1.67 kHz。这是由于脉冲超声工艺改变了Cu元素在 α -Al中的分布曲线,在一定范围内提高了Cu元素的有效分配系数 k_e ,对脉冲超声功率与施振时间影响较大,改变了Cu元素在凝固过程中的溶质再分配行为,改善了ZL205A合金微观偏析。严青松等^[54]的研究发现,在ZL205A合金凝固过程中施加行波磁场会使合金中的Cu元素分布更加均匀,细化颗粒相形成的沉积层厚度,随励磁电流增加逐渐减小直至消失。这是由于在行波磁场的作用下细化颗粒相发生了迁移,分布更加均匀,同时也提高了试样上部的形核率,减小了试样上部的晶粒尺寸。相比单一超声场,采用超声和压力耦合的方法更容易促使熔体内部出现均匀的温度场,同时消除单一超声作用导致的铸锭内部晶粒细化的差异性,使微观组织分布更均匀^[55],如图12所示。

铝合金熔体处理工艺的选择和使用在工程应用

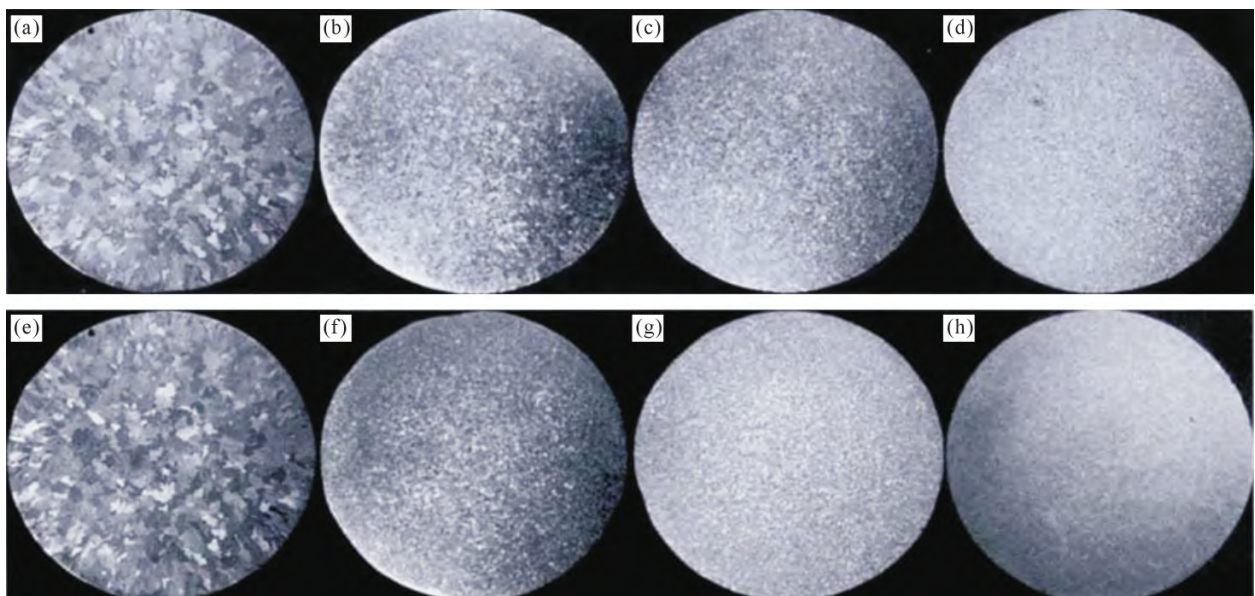
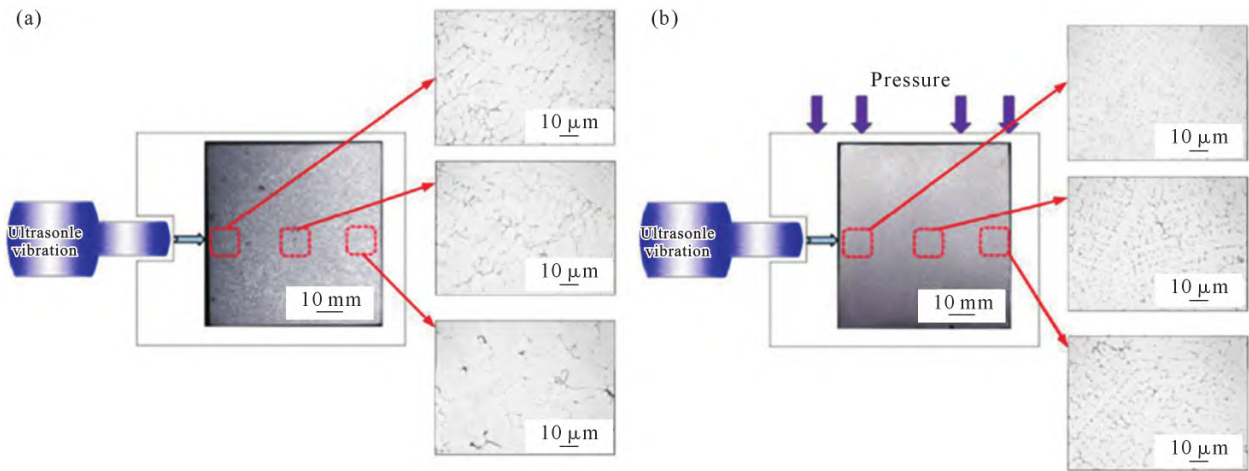


图11 经不同Al-Ti-B添加量细化的A357合金试样宏观组织:(a) 0%Al-5Ti-1B; (b) 0.7%Al-5Ti-1B; (c) 1%Al-5Ti-1B;

(d) 1.5%Al-5Ti-1B; (e) 0%Al-3Ti-3B; (f) 0.7%Al-3Ti-3B; (g) 1%Al-3Ti-3B; (h) 1.5%Al-3Ti-3B^[49]

Fig.11 Microstructure of A357 Al alloy refined by different Al-Ti-B additions: (a) 0 wt.% Al-5Ti-1B; (b) 0.7 wt.% Al-5Ti-1B; (c) 1 wt.% Al-5Ti-1B; (d) 1.5 wt.% Al-5Ti-1B; (e) 0 wt.% Al-3Ti-3B; (f) 0.7 wt.% Al-3Ti-3B; (g) 1 wt.% Al-3Ti-3B; (h) 1.5 wt.% Al-3Ti-3B^[49]

图 12 铸锭不同部位宏观组织和显微组织:(a) 单一超声场;(b) 超声和压力耦合^[55]Fig.12 Macroscopic material and microstructure of different parts of the ingot: (a) single ultrasonic field; (b) ultrasonic and pressure coupling^[55]

中至关重要,无论是熔体净化、熔体孕育处理还是熔体均匀化处理,都对后续铸件的质量和本体性能有很大影响。虽然当前在熔体处理领域开展了大量研究,但是多数停留在试验阶段或者在小型铝合金铸件中得到应用,并且研究因素单一。对于大型铝合金复杂铸件而言,其熔体量大,处理时间较长,熔体处理中各因素相互影响,难以满足工程应用对熔体质量的要求,特别是航空航天领域。因此,需要综合考虑熔体处理中各因素之间的相互影响,研究其交互作用机理,才能不断提高熔体质量及铸件本体性能,为我国航空航天向更高、更强发展打下坚实基础。

3.3 热处理组织调控

热处理在铝合金铸件的应用过程中扮演着重要角色,在固溶强化和析出强化的双重作用下,铝合金铸件的性能会得到很大提升。因此,合理选择热处理参数在实际工程应用中至关重要。

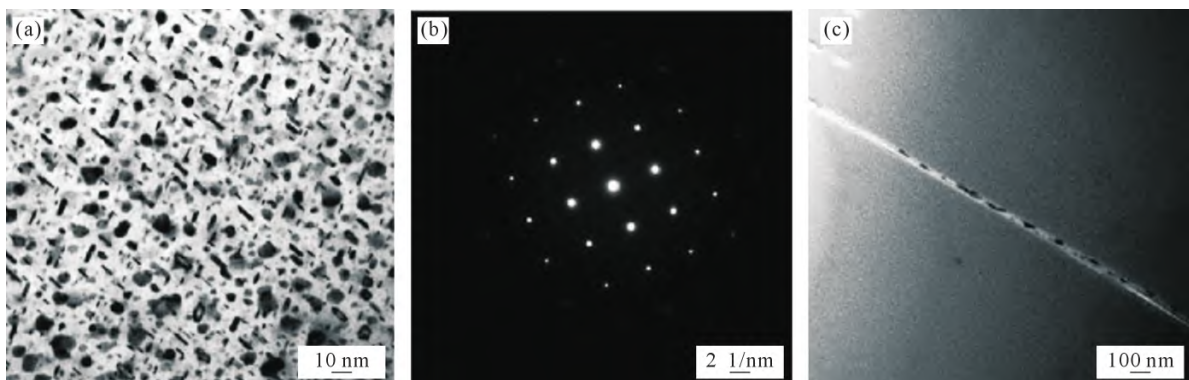
康福伟等^[56]发现在对 ZL114A 合金进行热处理时,当固溶温度达到 550 °C 时,合金晶粒粗大,出现过烧现象。研究表明,最合适的热处理工艺参数为 535 °C/12 h+155 °C/6 h。王蒙蒙等^[57]研究发现,当热

处理工艺参数为 550 °C×10 h (固溶)+170 °C×5 h (时效)时,Al-Cu-Mn 系铸造铝合金性能最好。在单级固溶的基础上,采取多级固溶的方式可以使第二相粒子更充分地溶入基体中,提高固溶效果^[58-60]。陈开媛等^[61]提出了一种新型高温固溶强化制度,通过在临界过烧温度下对合金进行短时高温固溶处理,有效解决了高含量合金在常规固溶制度下第二相粒子固溶不充分的问题。并且通过分析不同时效温度下合金析出相的种类和形貌分布(图 13),为合金在不同服役情况下的热处理工艺选择提供了理论依据。

同样的,在铝合金的热处理中,时效工艺是改善合金微观组织、提高性能的关键。目前行业内工程生产过程中常用时效工艺多为单级时效,但由于铸造铝合金成分复杂,通过单一时效处理难以发挥出高强韧铸造铝合金的优势,因此,后续可针对双级时效^[62]、回归再时效^[63-65]、双峰时效^[66-67]等热处理工艺开展进一步研究,并尽早实现工程应用。

3.4 大型复杂铝合金铸件生产装备

目前大型复杂铝合金铸件无论砂型铸造或熔模精密铸造均采用反重力浇注成形,分为低压铸造、真

图 13 合金经过时效处理后的 TEM 图:(a) 晶内明场相;(b) 衍射花样;(c) 晶界明场相^[61]Fig.13 TEM images of the alloy after aging: (a) intragranular bright-field TEM image; (b) corresponding SAED pattern; (c) bright-field TEM image at grain boundary^[61]

空吸铸和差压(正压或负压)铸造。反重力铸造装置一般由上罐体、下罐体、中隔板、保温炉和升液管等组成,铸型放在上罐内,金属保温炉放在下罐内,可以实现低压铸造、真空吸铸、真空吸铸加压凝固、负压差压铸造和正压差压铸造。国内外反重力铸造装备相对比较成熟,基本满足了高质量铸件的生产需求。

对于砂型或熔模精密铸造在产品研制阶段可采用3D打印砂型或蜡模的方法满足铸型生产要求,现有的3D打印装备也比较成熟。航空航天铸件一方面因产品质量要求高,其铸造工艺设计较其他行业铝合金铸件复杂,且为单件小批量生产,因此市场中成熟的铸型批生产自动化装备无法满足生产要求,人工操作介入工序较多,同时也增加了批生产过程质量控制的难度。因生产工艺及产品种类的不同,企业需要根据自身特点针对性地开展非标自动化装备的设计开发。如中国航发621所和120厂、航空工业3017厂等,但因产品种类繁多,实现完全自动化难度较大。另外航空航天铸造企业中普遍存在生产过程质量基础数据采集不足的问题,不仅影响生产过程的质量稳定性,也限制了大型复杂铸件性能的进一步提升。

4 总结和展望

铝合金材料正朝着高综合性能、低密度、大规格、高均匀性和材料/结构一体化方向发展,为航空航天和高端装备的高性能制造提供支撑。大型高强韧复杂铝合金铸件是现代航空、航天轻量化发展的基础装备需要,高强韧铝合金材料也是未来科学与工程研究的热点。针对未来大型铝合金复杂铸件制造技术的发展,应当从已应用材料和新型高强铝合金出发,对以下几方面作出展望。

(1)未来大型复杂铝合金铸件性能要求越来越高,现有砂型铸造或熔模精密铸造单一方法难以满足要求,需要进一步突破铝合金复合铸型内部质量调控技术、大型复杂构件尺寸稳定化控制技术,以解决单一铸型尺寸精度、力学性能及内部质量综合兼顾的难题。

(2)从材料角度出发,充分重视铝合金新材料的开发应用,如铝锂合金、高强耐热铝合金等为铸件的轻量化、高强度、耐热化提升提供材料支撑,以更好支持装备发展;从熔体处理角度出发,进一步加强熔体处理中各关键因素之间交互作用的机理及铸件凝固过程中温度场和流动场对合金组织和缺陷的影响,从根本理论层面建立起高质量铸件的制造准则。

(3)探索大型复杂铸件新的热处理工艺及强化

机理,如多级高固溶温度处理再多级时效处理、重固溶再多级时效处理、强变形诱导析出相回归后再时效等,提高合金基体的高过饱和固溶度,沉淀相的体积分数等,进一步提高铸件的力学性能上限。

(4)根据企业自身特点加大自动化装备的设计开发,提高大型复杂铸件生产质量可靠性,同时对现有工艺进行技术改进适应生产装备的自动化升级;重视铸造工艺及质量基础数据的采集工作,提升质量可靠性的,同时为铸件性能提升改进提供支撑。

参考文献:

- [1] 郭凡,崔保伟,胡婉婷,杨堃,王明杰,商立瞳,王萍,刘健,黄艳军. ZL205A 合金凝固元素偏析对液相密度的影响[J]. 铸造技术, 2022, 44(3): 1191-1196.
GUO F, CUI B W, HU W T, YANG K, WANG M J, SHANG L T, WANG P, LIU J, HUANG Y J. Study on ZL205A alloy elements segregation in solidification process of liquid density[J]. Foundry Technology, 2022, 44(3): 1191-1196.
- [2] AROWOSOLA A, GAUSTAD G. Estimating increasing diversity and dissipative loss of critical metals in the aluminum automotive sector[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 150: 104382.
- [3] 李斌,董丽虹,王海斗,周永欣,高冲. 航空航天铝合金腐蚀疲劳研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 106-118.
LI B, DONG L H, WANG H D, ZHOU Y X, GAO C. Research progress on corrosion fatigue of aerospace aluminum alloy[J]. Surface Technology, 2021, 50(7): 106-118.
- [4] SATYAJEET K, SHAILESH K S, JAYSHANKAR K, QASIM M. Synthesis and characterization of Al-alloy by mechanical alloying [J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 3237-3242.
- [5] 施丽铭,杨鹏,周志勇,成志忠. 国内外航天器密封舱主结构材料的选用[J]. 航天器工程, 2013, 22(5): 136-141.
SHI L M, YANG P, ZHOU Z Y, CHENG Z Z. Materials selection of primary structure for sealed module of spacecraft in China and other countries[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(5): 136-141.
- [6] 王惠芬,杨碧琦,刘刚. 航天器结构材料的应用现状与未来展望 [J]. 材料导报, 2018, 32(S1): 395-399.
WANG H F, YANG B Q, LIU G. Application status and future prospect of materials for spacecraft structures[J]. Materials Reports, 2018, 32(S1): 395-399.
- [7] WANG F, ZENG Y Q, XIONG B Q, ZHANG Y A, LI X W, LI Z H, LIU H W. Effect of Si addition on the microstructure and mechanical properties of Al-Cu-Mg alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 585: 474-478.
- [8] 樊自田,蒋文明,赵忠. 铝(镁)合金消失模铸造近净成形技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2011, 30(7): 38-47.
FAN Z T, JIANG W M, ZHAO Z. New technological advance in lost foam casting process for Al alloy and Mg alloy[J]. Materials China, 2011, 30(7): 38-47.
- [9] 马福民,曲银辉,王涛,张杰,姜宏顺,董生. ZL205A 铝合金筒类铸件铸造工艺研究[J]. 铸造, 2014, 63(9): 938-941.

- MA F M, QU Y H, WANG T, ZHANG J, JIANG H S, DONG S S. Study on casting process for ZL205A sleeve type castings[J]. Foundry, 2014, 63(9): 938-941.
- [10] 邢志媛, 侯立群, 朱秀荣, 刘环恩, 秦丽柏, 董俊岐, 范云波. 差压铸造 ZL205A 合金的组织及性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34(6): 93-95.
- XING Z Y, HOU L Q, ZHU X R, LIU H E, QIN L B, DONG J Q, FAN Y B. Microstructure and property of ZL205A alloy by counter-pressure casting[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2011, 34(6): 93-95.
- [11] 罗传彪, 杜旭初, 樊振中, 李大奎, 厉沙沙. 铸造工艺对 ZL114A 铝合金铸件性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(6): 652-656.
- LUO C B, DU X C, FAN Z Z, LI D K, LI S S. Effect of casting process on properties of ZL114A aluminum alloy castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2015, 35(6): 652-656.
- [12] WANG Z H, ZHANG L T, SU B, ZHANG X P. Simulation on microstructure evolution of Al-Si alloy under effect of natural convection during solidification[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(1): 79-90.
- [13] 樊振中, 徐秀丽, 王玉灵, 刘建军. 熔模精密铸造技术在航空工业的应用及发展[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(3): 285-289.
- FAN Z Z, XU X L, WANG Y L, LIU J J. Investment casting technology application and development in the aviation industry[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(3): 285-289.
- [14] MONDAL B, KUNDU S, LOHAR A K, PAI B C. Net-shape manufacturing of intricate components of A356/SiC composite through rapid-prototyping integrated investment casting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 498(1-2): 37-41.
- [15] 樊振中. 熔模精密铸造在航空航天领域的应用现状与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2019, 62(9): 38-52.
- FAN Z Z. Investment precision application status and development in the aeronautics and aviation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(9): 38-52.
- [16] 吕志刚. 我国熔模精密铸造的历史回顾与发展展望[J]. 铸造, 2012, 4: 347-356.
- LYU Z G. History and development trend of investment casting industry in China[J]. Foundry, 2012, 4: 347-356.
- [17] 熊艳才. 精密铸造技术在航空工业中的应用和发展[J]. 航空制造技术, 2008(22): 32-35.
- XIONG Y C. Development and application of precision casting technology in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(22): 32-35.
- [18] 周永江, 张喆, 熊艳才, 洪润洲. 铝合金复杂管铸件树脂砂型真空吸铸工艺[J]. 热加工工艺, 2012, 41(21): 29-31.
- ZHOU Y J, ZHANG Z, XIONG Y C, HONG R Z. Resin sand mold vacuum suction casting process for complex aluminum alloy tube castings[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(21): 29-31.
- [19] 樊振中, 周永江, 洪润洲, 熊艳才, 杨守杰. 一种整体叶轮树脂砂和金属型复合铸型及制备方法: CN201710909374.9[P]. 2019-06-04.
- FAN Z Z, ZHOU Y J, HONG R Z, XIONG Y C, YANG S J. A composite casting mold of integral impeller resin sand and metal mold and its preparation method: CN201710909374.9[P]. 2019-06-04.
- [20] 熊艳才. 铝合金复合型精密铸造工艺研究与应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2008(S1): 469-471.
- XIONG Y C. Study and application on composite mode of cast aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2008(S1): 469-471.
- [21] COLOMBOM, GARIBOLDI E, MORRI A. Er addition to Al-Si-Mg-based casting alloy: Effects on microstructure, room and high temperature mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 708: 1234-1244.
- [22] 解传浩, 陈振中. A357 铸造合金力学性能研究[J]. 飞机设计, 2010, 30(3): 42-44.
- XIE C H, CHEN Z Z. Study on mechanical properties of A357 casting aluminum alloy[J]. Aircraft Design, 2010, 30(3): 42-44.
- [23] 王东成. ZL114A 合金组织与力学性能的综合优化[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2010.
- WANG D C. Comprehensive optimization of microstructure and mechanical properties in ZL114A alloy[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2010.
- [24] ALEXOPOULOS, NIKOLAOS D, STYLIANOS A, COMPELL J. Dynamic fracture toughness of Al-7Si-Mg (A357) alloy[J]. Mechanics of Materials, 2013, 58: 55-68.
- [25] CESCHINI L, MORRI A, MORRI A, GAMBERINI A, MESSIERI S. Correlation between ultimate tensile strength and solidification microstructure for the sand cast A357 aluminium alloy[J]. Materials and Design, 2009, 30(10): 4525-4531.
- [26] 张海珍, 白培康, 杨晶. 高性能铝铜合金铸造性能的研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(1): 64-66.
- ZHANG H Z, BAI P K, YANG J. Study on casting properties of high performance Al-Cu alloy[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(1): 64-66.
- [27] 杜康, 王军强, 曹海龙, 刘成. 航空航天用铝锂合金研究进展及发展趋势[J]. 铝加工, 2022, 265(2): 3-9.
- DU K, WANG J Q, CAO H L, LIU C. Research progress and development trend of aluminium-lithium alloy for aerospace applications[J]. Aluminium Fabrication, 2022, 265(2): 3-9.
- [28] 邝泉波, 王日初, 彭超群, 蔡志勇, 冯艳, 王小锋. 铝锂合金制备及强化研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(8): 2140-2159.
- KUANG Q B, WANG R C, PENG C Q, CAI Z Y, FENG Y, WANG X F. Research progress on preparation and obdurability of aluminum-lithium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(8): 2140-2159.
- [29] 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 P. Preparation process and properties of 8090 aluminium-lithium alloy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [30] 严兆祥, 潘宇, 李建宇, 吕书林, 吴树森, 郭威. 铝锂合金熔炼及凝固成形技术研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(12): 3514-3525.
- YAN Z X, PAN Y, LI J Y, LYU S L, WU S S, GUO W. Research progress of melting and solidification forming technology for Al-Li alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53

- (12): 3514-3525.
- [31] 石宝东,潘复生,陈先华,汤爱涛,彭建. 铝合金熔体净化工艺的研究进展[J]. 材料导报, 2009, 23(4): 45-65.
- SHI B D, PAN F S, CHEN X H, TANG A T, PENG J. Research and development of purification technologies of aluminum alloy melt[J]. Materials Reports, 2009, 23(4): 45-65.
- [32] 蒋海燕,孙宝德,倪红军,丁文江. 脉冲进气旋转喷吹技术的水力模拟[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(1): 44-47.
- JIANG H Y, SUN B D, NI H J, DING W J. Water modeling of rotating impeller degassing with pulse gas current [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(1): 44-47.
- [33] 倪红军,黄明宇,朱昱. 铝熔体熔剂的应用与研究[J]. 铸造技术, 2004, 25(5): 402-404.
- NI H J, HUANG M Y, ZHU Y. Application and investigation of fluxes for aluminum melting body [J]. Foundry Technology, 2004, 25(5): 402-404.
- [34] 倪红军. 新型熔剂对铝熔体覆盖保护和净化的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2003.
- NING H J. Study on covering protection and purification of aluminum melt by new flux [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2003.
- [35] NI H J, SUN B D, DING W J. Purification of scrap aluminum foil and aluminum melt covering and protecting & atomic purification theory[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(3): 521-526.
- [36] 许广济,金玉嘉,刘光林,丁雨田,王纯宏,余荣华. 影响铝熔体电磁净化效果因素的分析[J]. 铸造技术, 2006, 27(6): 629-632.
- XU G J, JIN Y J, LIU G L, DING Y T, WANG C H, YU R H. Discussion of the effects on electromagnetic separation efficiency of aluminum melts[J]. Foundry Technology, 2006, 27(6): 629-632.
- [37] SHU D, SUN B D, LI K, XU Z M, ZHOU Y H. Continuous separation of nonmetallic inclusions from aluminum melt using alternating magnetic field[J]. Material Letters, 2002, 55(5): 322-326.
- [38] ZHANG B W, REN Z M, WU J X. Continuous electromagnetic-separation of inclusion from aluminum melt using alternating current[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16: 33-38.
- [39] 姜坤,刘桂亮,赵凯,孙谦谦,刘相法. 抗 Si“中毒”Al-Ti-C-B 晶种合金对 ZL114A 铝合金组织和力学性能的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(16): 16076-16080.
- JIANG K, LIU G L, ZHAO K, SUN Q Q, LIU X F. Effect of anti Si ‘poisoning’ AlTiC-B materials alloy on the microstructure and mechanical properties of ZL114A aluminum alloy[J]. Materials Reports, 2021, 35(16): 16076-16080.
- [40] CHEN Z N, KANG H J, FAN G H, LI J H, LU Y P, JIE J C, ZHANG Y B, LI T J, JIAN X G, WANG T M. Grain refinement of hypoeutectic Al-Si alloys with B[J]. Acta Materialia, 2016, 120: 168-178.
- [41] 赵淑荣,金青林,刘斌. 变质处理对 ZL114A 合金组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 39(13): 71-74.
- ZHAO S R, JIN Q L, LIU B. Effect of modification treatment on microstructure and property of ZL114A alloy[J]. Hot Working Technology, 2019, 39(13): 71-74.
- [42] 廖恒成,丁毅,孙国雄. Sr 对近共晶 Al-Si 合金中 α -Al 枝晶生长行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 38(3): 245-249.
- LIAO H C, DING Y, SUN G X. Effect of strontium on growth of α dendrite in near-eutectic Al-Si alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(3): 245-249.
- [43] XIAO D H, SONG M, CHEN K H, HUANG B Y. Effect of rare earth Yb addition on mechanical properties of Al-5.3Cu-0.8Mg-0.6Ag alloy[J]. Materials Science and Technology, 2007, 23(10): 1156-1160.
- [44] VAN DALEN M E, GYGER T, DUNAND D C, SEIDMAN D N. Effects of Yb and Zr microalloying additions on the microstructure and mechanical properties of dilute Al-Sc alloys[J]. Acta Materialia, 2011, 59(20): 7615-7626.
- [45] CHEN Z W, CHEN P, LI S S. Effect of Ce addition on microstructure of Al₂₀Cu₂Mn₃ twin phase in an Al-Cu-Mn casting alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, A532(3): 606-609.
- [46] LI G F, ZHANG X M, ZHU H F. Effects of minor Er and Y addition to Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy on microstructures and mechanical properties [J]. Journal of Materials Engineering, 2010, 24(5): 78-82.
- [47] 刘旭,杨亚峰. 变质处理对 Al-Cu 合金力学性能与组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(9): 1026-1029.
- LIU X, YANG Y F. Effects of modification on mechanical properties and microstructure of Al-Cu alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2017, 37(9): 1026-1029.
- [48] 韩玉科, 杨琦. 铸造 ZL205A 合金的变质处理与蠕变性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(8): 921-924.
- HAN Y K, YANG Q. Modification and creep properties of cast ZL205A alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2017, 37(8): 921-924.
- [49] 章爱生,黄为民,颜小明. Al-Ti-B 细化剂和 Al-10Sr 变质剂对 A357 合金的联合作用[J]. 铸造, 2013, 62(8): 725-732.
- ZHANG A S, HUANG W M, YAN X M. Effects of combined additions of Al-Ti-B grain refiners and Al-10Sr modifier on A357 alloy[J]. Foundry, 2013, 62(8): 725-732.
- [50] 冯菁菁. 不同变质剂对铝合金组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2012, 41(15): 53-55.
- FENG J J. Effect of different modifiers on microstructure and mechanical properties of LM28 [J]. Hot Working Technology, 2012, 41(15): 53-55.
- [51] 李楠,邢书明,鲍培玮,郭文龙. 流变挤压铸造 7075 铝合金的组织及力学性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2008(S): 419-423.
- LI N, XING S M, BAO P W, GUO W L. Research on mechanical property and structure of 7075 wrought aluminum alloy through rheocasting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2008(S): 419-423.
- [52] HAN Y, SAMUEL L A M, DOTY H W. Optimizing the tensile properties of Al-Si-Cu-Mg 319-type alloys: Role of solution heat treatment[J]. Materials and Design, 2014, 58(6): 426-438.
- [53] 何敏,张志峰,毛卫民,关天洋,杨玉洁,李豹. 螺旋环缝电磁场对 7075 合金熔体处理过程中多物理场及组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(10): 1045-1050.
- HE M, ZHANG Z F, MAO W M, GUAN T Y, YANG Y J, LI B. Effects of spiral electromagnetic field on multi-physical field and solidification structure of 7075 aluminum alloy in melt treat-

- ment process[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2018, 38(10): 1045-1050.
- [54] 严青松, 芦刚, 王清, 段勇标. 脉冲超声工艺对 ZL205A 合金微观组织及偏析的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(2): 279-285.
- YAN Q S, LU G, WANG Q, DUAN Y B. Effect of pulsed ultrasonic process on microstructure and microsegregation of ZL205A alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(2): 279-285.
- [55] 林波, 林驰皓, 范滔, 张杨, 张卫文. 超声和压力耦合场对 Al-Cu 合金的作用机理及显微组织影响[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(7): 1818-1826.
- LIN B, LIN C H, FAN T, ZHANG Y, ZHANG W W. Effect of ultrasound vibration and pressure coupling field on function mechanism and microstructure of Al-Cu alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(7): 1818-1826.
- [56] 康福伟, 李如一, 乔昕, 张继敏, 樊德智. 热处理工艺对 ZL114A 铝合金组织及力学性能的影响[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2019, 24(1): 113-117.
- KANG F W, LI R Y, QIAO X, ZHANG J M, FAN D Z. Effects of heat treatment processing on the microstructure and mechanical properties of ZL114A aluminum alloy[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2019, 24(1): 113-117.
- [57] 王蒙蒙, 张德恩, 卢锦德, 张仁国. Al-Cu-Mn 系新型铝合金热处理工艺研究[J]. *热加工工艺*, 2013, 42(6): 159-163.
- WANG M M, ZHANG D E, LU J D, ZHANG R G. Study on heat treatment process of new-type cast aluminum alloy of Al-Cu-Mn series[J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42(6): 159-163.
- [58] 王基月, 徐莉萍. 双级固溶处理对 7075 高强铝合金组织和性能的影响[J]. *金属热处理*, 2020, 45(3): 166-168.
- WANG J Y, XU L P. Effect of two-stage solution treatment on microstructure and properties of 7075 high strength aluminum alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45(3): 166-168.
- [59] 刘敬福, 李赫亮, 刘传东, 闫喜鹏. 双级固溶处理对 Al-Cu 合金组织与电化学性能的影响[J]. *金属热处理*, 2014, 39(7): 121-124.
- LIU J F, LI H L, LIU C D, YAN X P. Effect of two-stage solid solution on microstructure and electrochemical property of Al-Cu alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2014, 39(7): 121-124.
- [60] 任建平, 宋仁国, 陈小明, 李杰. 7XXX 系铝合金热处理工艺的研究现状及进展[J]. *热加工工艺*, 2009, 38(6): 119-124.
- REN J P, SONG R G, CHEN X M, LI J. Development and states of heat-treatment process for 7xxx series aluminum alloys[J]. *Hot Working Technology*, 2009, 38(6): 119-124.
- [61] 陈开媛, 郑晓静, 张毅. 一种新型 7XXX 系铝合金热处理工艺研究[A]. *中国核学会 2019 年学术年会论文集第 4 册(同位素分离分卷)*[C]. 包头: 中国核学会, 2019. 477-483.
- CHEN K Y, ZHENG X J, ZHANG Y. Study on the heat treatment process of a new 7xxx aluminum alloy[A]. *Proceedings of the 2019 Annual Conference of the Chinese Nuclear Society (Volume 4: Isotope Separation Section)*[C]. Baotou: Chinese Nuclear Society, 2019. 477-483.
- [62] WIDENER C A, BURFORD D A, KUMAR B, TALIA J E, TWEEDY B. Evaluation of post-weld heat treatments to restore the corrosion resistance of friction stir welded aluminum alloy 7075-T73 vs. 7075-T6[J]. *Materials Science Forum*, 2007(539-543): 3781-3788.
- [63] OSAKI S, ITOH D. SCC properties of 7050 series aluminum alloys in T6 and RRA tempers[J]. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 2001(4): 222-227.
- [64] 李文斌, 潘清林, 刘俊生, 梁文杰, 刘晓艳, 何运斌. 回归再时效处理对含 Sc 超高强 Al-Zn-Mg-Cu-Zr 合金组织与性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2010, 39(9): 1646-1650.
- LI W B, PAN Q L, LIU J S, LIANG W J, LIU X Y, HE Y B. Effects of retrogression and re-aging treatment on microstructures and mechanical properties of ultrahigh strength Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy containing Sc[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, 39(9): 1646-1650.
- [65] 高依飞. 回归再时效对 7150 铝合金的显微组织和断裂行为的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- GAO Y F. Effect of retrogression and RE-aging on microstructure fracture behavior of 7150 aluminum alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [66] 滕天娇. RRA 处理对 Al-6Zn-2Mg-2Cu 合金组织及耐蚀性的影响[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
- TENG T J. Effect of RRA treatment on microstructure and corrosion resistance of Al-6Zn-2Mg-2Cu alloy[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
- [67] NIE X W, ZHANG L J, DU Y. Experiments and modeling of double-peak precipitation hardening and strengthening mechanisms in Al-Zn-Mg alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(7): 2138-2144.

(责任编辑: 李亚敏)