

退火及深冷处理对 SLM 成形 ZL114A 合金组织及性能的影响

耿楠楠 徐志锋 梁 祥
(南昌航空大学航空制造工程学院)

摘 要 以选区激光烧结(SLM)成形 ZL114A 合金为研究对象,进行了 SLM 成形 ZL114A 合金的退火和深冷处理工艺试验,主要研究了退火温度和深冷保温时间对 SLM 成形 ZL114A 合金微观组织和力学性能的影响。结果表明,230 ℃×2 h 退火处理后,SLM 成形 ZL114A 合金的伸长率提高了 18.0%,抗拉强度下降了 2.9%;300 ℃×2 h 退火处理导致合金的抗拉强度和伸长率下降了 28.2%和 22.3%;合金退火态的微观组织表现为 α-Al 与 Si 相交界面存在大量的孔洞。而深冷处理(−196 ℃)对 SLM 成形 ZL114A 合金的力学性能有明显改善,其中深冷保温 36 h 对力学性能提升效果最佳,相较沉积态,其抗拉强度提高了 18.9%,伸长率提高了 23.0%;其深冷态的共晶 Si 在基体中分散更均匀,并转为棒状结构,使合金的塑性得到明显提高。

关键词 SLM;ZL114A 合金;退火;深冷处理;力学性能

中图分类号 TG146.21;TG156.9

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.02.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Annealing and Cryogenic Treatment on Microstructure and Properties of ZL114A Alloy Formed by SLM Technology

Geng Nannan, Xu Zhifeng, Liang Xiang

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: The effects of annealing temperature and cryogenic holding time on the microstructure and mechanical properties of SLM-formed ZL114A alloy were investigated by OM, SEM, EDS and tensile testing. The results demonstrate that after 230 ℃×2 h annealing treatment, the elongation of the alloy is increased by 18.04%, while the tensile strength is decreased by 2.94%, and annealing treatment at 300 ℃×2 h results in a decrease of 28.19% in tensile strength and 4.55% in elongation of the alloy. The annealed microstructure of the alloy presents a large number of pores at the junction of α-Al and Si phase. Cryogenic treatment (−196 ℃) can significantly improve the mechanical properties of SLM-formed ZL114A alloy, where the holding time of 36 h has the best effect. Compared with the those of deposited state ones, its tensile strength and elongation are increased by 18.99% and 23.03%, respectively. The cryogenic eutectic Si is more evenly dispersed in the matrix and transformed into a rod-like structure, which significantly enhances the plasticity of the alloy.

Key Words: SLM, ZL114A Alloy, Annealing, Cryogenic Treatment, Mechanical Properties

ZL114A 合金是一种具有高比强度、高韧性的亚共晶 Al-Si 系合金,因其较高的力学性能与熔铸工艺性能而得到广泛应用。随着航空航天领域的许多复杂关键结构件对形状及性能的要求日益严苛,传统的成形方法日益受到挑战^[1~3]。激光选区熔化(Selective laser melting,SLM)成形技术具有可直接获得复杂形状零件,同时实现“控形/控性”一体化的特点,是近年来的研究热点之一^[4,5],但目前 SLM 成形的 ZL114A 合金仍

存在微孔及较大的残余应力等缺陷,因此需要通过后续的热处理工艺来改善其微观组织,进一步稳定和提升其力学性能^[6~8]。

深冷处理作为一种特殊的热处理工艺,目前已广泛应用于铸铁、铸钢,近年来,对于铝合金的深冷处理也得到关注。刘轩之等^[9]通过改变深冷处理工艺参数,分析了 7050 铝合金尺寸稳定性和断裂韧度受深冷处理的影响,结果表明,经深冷处理后,材料中的残余应力提前得

收稿日期:2020-08-11;修改稿收到日期:2020-09-18

第一作者简介:耿楠楠,女,1998 年出生,学士,南昌(330063),E-mail:1983281675@qq.com

通信作者:徐志锋,男,1968 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:xu_zhf@163.com

引用格式:耿楠楠,徐志锋,梁祥. 退火及深冷处理对 SLM 成形 ZL114A 合金组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(2):189-194.

GENG N N, XU Z F, LIANG X. Effects of annealing and cryogenic treatment on microstructure and properties of ZL114A alloy formed by slm technology[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(2):189-194.

到释放,促使微观组织析出相增加,从而使合金的尺寸稳定性及断裂韧度提高。姜小坤等^[10]研究了深冷处理对 2.5D-C_f/Al 复合材料残余应力及力学性能的影响,并将之与铸态、退火态相比,结果发现,深冷处理后,合金残余应力更彻底地释放,其抗拉强度比铸态提升约 13.4%,表现出显著的韧性断裂特征。高文林等^[11]研究了深冷处理对峰值时效析出相的影响,结果表明,深冷处理可降低组织中 Zn 和 Mg 的偏聚,提高析出相分布的均匀性,同时提高单位体积内析出相数量,实现弥散强化的效果。刘辉等^[12]研究了深冷处理对 LC9 铝合金力学性能和摩擦因数的影响,发现深冷处理后 LC9 铝合金的弹性回复系数、抗压痕变形能力显著提高,硬度、硬弹比、弹性模量较退火态均有提高,但摩擦因数减小。不同工艺参数下的深冷处理,对铝合金件的致密度、显微形貌和力学性能等均有不同程度的影响,总体使铝合金件残余应力提前得到释放,提高析出相的分布均匀性,提升其力学性能,但对于 SLM 成形铝合金的深冷处理还未见相关报道。

另外,铝合金退火处理是改善其组织、释放残余应力的传统有效手段,BRICE C 等^[13]通过研究退火及时效处理对增材制造 2139 铝合金力学性能的影响发现,增材制造 2139 铝合金热处理后的力学性能可媲美锻造 2139 铝合金的。余开斌等^[14]研究了退火、固溶、T6 等热处理方式对 SLM 成形 AlSi10Mg 铝合金显微组织与力学性能的影响,结果表明,合金经退火后,共晶 Si 相发生溶断、钝化,合金强度略有下降,硬度略有提升。目前国内外对 SLM 成形铝合金的研究更多集中在 Al-Si7Mg、AlSi10Mg、AlSi12 等铝合金的工艺参数优化及致密度、显微形貌和力学性能等方面的研究,而对 ZL114A 铝合金的 SLM 成形工艺及其后续热处理工艺研究报道很少。

因此,本课题以 SLM 成形 ZL114A 铝合金为研究对象,并对其进行退火处理及深冷处理,主要研究退火处理温度和深冷处理保温时间对 SLM 成形的 ZL114A 铝合金的显微组织和力学性能的影响,并进一步探讨其断裂机理,旨在为拓展其应用提供参考。

1 试验材料、方法与设备

1.1 试验材料

铝合金选用 ZL114A 合金粉末,其成分见表 1,颗

表 1 ZL114A 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZL114A aluminum alloy %					
w_B					
Si	Mg	Fe	Ti	Mn	Al
7.2	0.54	0.11	0.12	<0.1	余量

粒粒径范围为 20~60 μm 。使用 SLM-300 型成形设备,设置工艺参数见表 2,SLM 成形 $\phi 10\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 试样,再将 SLM 成形试样按图 1 加工成拉伸试样。

表 2 SLM 工艺参数表

Tab.2 SLM process parameters

激光功率/W	扫描速度/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	扫描间距/mm	铺粉厚度/mm
450	1 000	0.09	0.05

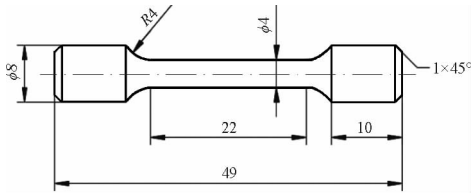


图 1 SLM 成形的 ZL114A 铝合金试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of SLM-produced ZL114A alloy

1.2 试验方法

将试样分为 7 组,其中第 1 组为沉积态,不进行深冷及退火处理;第 2、3 组进行退火处理;其余组进行深冷处理,具体工艺参数见表 3。

表 3 退火及深冷处理工艺参数

Tab.3 Process parameters of annealing and cryogenic treatment

组号	处理方式	处理温度/ $^{\circ}\text{C}$	保温时间/h	冷却方式
1	铸态	—	—	—
2	退火	230	2	炉冷
3	退火	300	2	炉冷
4	液氮深冷	-196	12	空冷
5	液氮深冷	-196	24	空冷
6	液氮深冷	-196	36	空冷
7	液氮深冷	-196	48	空冷

使用 D8ADVANCE-A25 型 X 射线衍射仪进行 XRD 分析,采用 MDI Jade6.5 软件进行物相标注;采用 W9W-50 形微机控制电子万能试验机进行拉伸试验;ZL114A 试样断口组织进行初步处理后放在扫描电镜 (SEM) 下观察;经过力学性能测试后的 ZL114A 试样进行镶样、磨光、抛光、腐蚀后采用 XSP-4XB 型光学显微镜观察金相组织。

2 试验结果与分析

2.1 退火及深冷处理对合金微观组织的影响

图 2 和图 3 分别为 SLM 成形 ZL114A 铝合金试样沉积态、退火态及深冷态的微观组织。可以看出,SLM 成形 ZL114A 铝合金试样沉积态存在较少的微观缺陷。与沉积态相比,退火处理后合金试样微观缺陷明显增加。对比不同退火温度下的显微组织,发现与 $230\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ 的退火态相比, $300\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ 的退火后黑色的孔洞更多、更大,组织均匀性更差。图 3 中深冷态组织缺陷较少,孔洞尺寸较小,且随着保温时间延长,缺陷先增加再

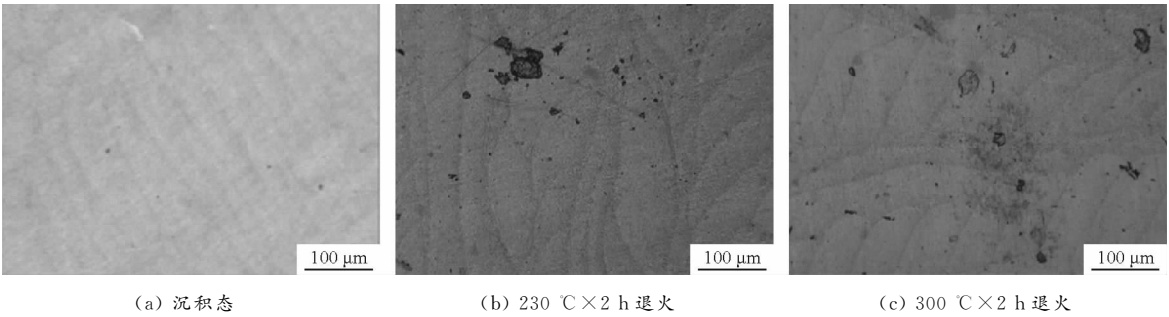


图 2 SLM 成形 ZL114A 铝合金试样退火处理前后的微观组织

Fig.2 Microstructure of SLM-formed ZL114A alloy before and after annealing treatment

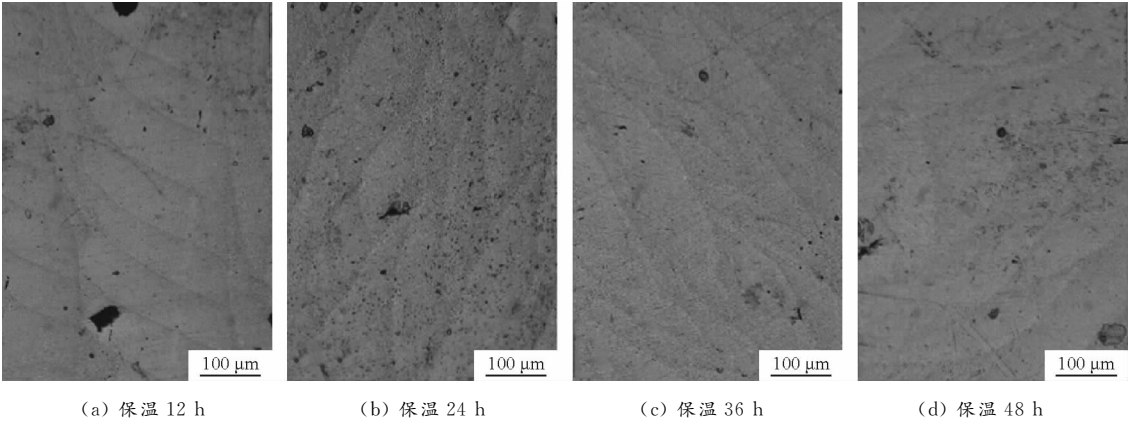


图 3 SLM 成形 ZL114A 铝合金深冷态的微观组织

Fig.3 Microstructure of SLM-formed ZL114A alloy in cryogenic state

减少,在深冷36 h时,缺陷最少,组织较好。这是因为, SLM 成形过程中,激光扫描速度较快,停留的时间很短,导致金属粉末吸收的激光能量不足,无法将其全部熔化,进而没有足够的金属液去填充金属颗粒间的缝隙^[15],从而导致沉积态微孔产生。而经过退火处理,Si 相由均匀分散的棒状转为细长条状,并连成片分布于

α -Al 相边界,原本分散在 α -Al 基体与 Si 相交界处的微孔,聚集成了更大尺寸的孔洞。但深冷处理时合金发生体积收缩,使得 Al-Si 交界处的微形孔洞得以弥补缩小。

选取退火及深冷处理中较好的 SEM 组织观察,见图4。可以看出,经退火处理后,显微组织呈现为细小

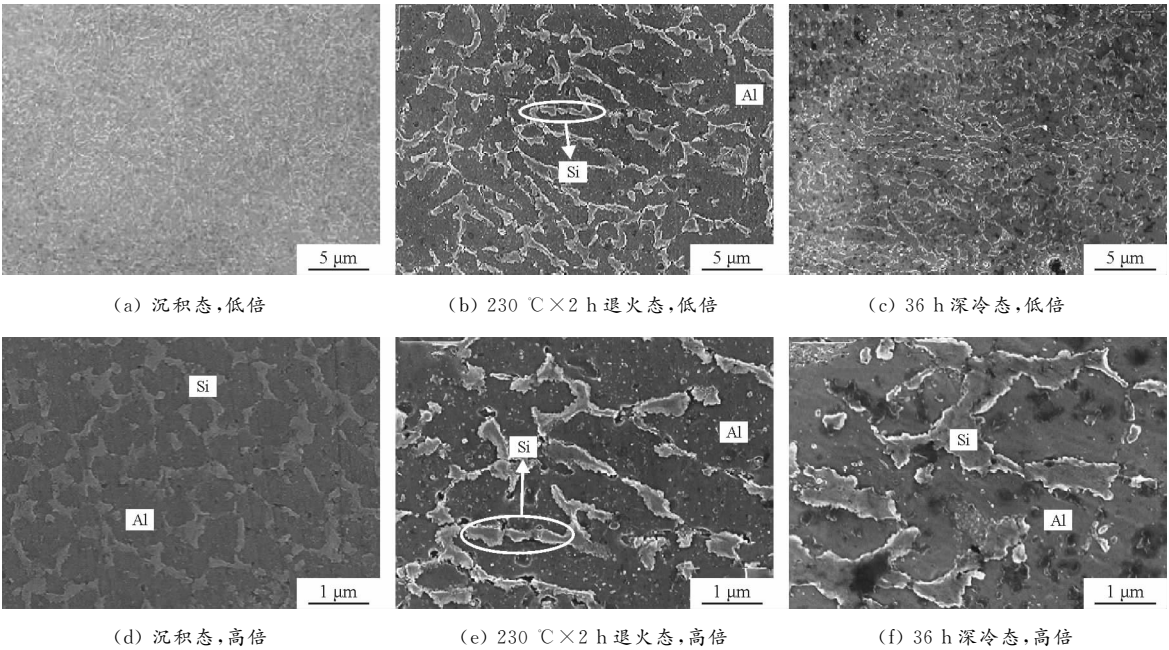


图 4 SLM 成形 ZL114A 合金沉积态、退火态、深冷态 SEM 图

Fig.4 SEM images of SLM-formed ZL114A in deposited, annealed and cryogenic state

的等轴晶组织,退火过程中,过饱和固溶于基体中的 Si 相开始析出,亚微米及纳米级的自由 Si 弥散分布在 α -Al 基体中,随着退火处理进行,Si 相不断聚集长大,最终在 α -Al 相边界以细长条状成片分布。原本分散在 α -Al 基体与 Si 相交界处的微孔,聚集成成了更大尺寸的孔洞。退火态组织中,Si 颗粒的聚集现象及在 α -Al 基体与 Si 相交界处存在大量的微小孔洞,导致其组织明显变差。

将 36 h 深冷态组织与沉积态、退火态组织相比(其中白色区域为 Si 相,黑色区域为 Al 相),可见沉积态为细小的等轴晶组织,Si 相呈分散的棒状,在基体中分布均匀,晶粒尺寸为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$;退火态也为细小的等轴晶组织,但 Si 相呈细长条状,连成片分布于 α -Al 边界,晶粒尺寸略有粗化;而深冷处理后的 ZL114A 铝合金组织, α -Al 基体中共晶 Si 仍保留细小棒状结构,晶粒尺寸并未像退火态一样粗化,且没有发生明显变化,晶格中大部分 Al 原子的位置被 Si 原子占据,因此 Si 在 Al 基体中过饱和固溶,产生了大量的晶格畸变,对 ZL114A 铝合金试样整体起到固溶强化的作用,使合金性能改善。这是因为 SLM 成形过程中,由于过快的激光扫描速度和熔池冷却速度,使其具有较大的过冷度和温度梯度,导致熔融金属液凝固过快,晶粒未长大就凝固,因此形成的晶粒极为细小^[15],同时大量 Si 被过饱和固溶于基体中,使其强度增大。而退火处理时,SLM 成形 ZL114A 铝合金加热到 $230\ ^\circ\text{C}$,过饱和固溶体极不稳定,退火后得到的是粗化的晶粒组织,Si 相形状和尺寸发生变化,对合金的力学性能产生影响^[16]。而深冷处理并未使晶粒粗化,仍保持原有晶粒大小,但其体积收缩使得 Al-Si 交界处的微形孔洞得以弥补缩合,从而使合金内的部分缺陷如微孔得到部分弥合,致密度提高,合金的性能提升。

2.2 退火及深冷处理对合金力学性能的影响

2.2.1 退火处理对合金力学性能的影响

SLM 成形 ZL114A 铝合金退火处理后的力学性能见图 5。可以看出,经 $230\ ^\circ\text{C}\times 2\ \text{h}$ 退火处理后,SLM 成形 ZL114A 铝合金抗拉强度为 $308.75\ \text{MPa}$,伸长率为 6.9% ,相较于沉积态伸长率提高了 18.0% ,抗拉强度下降了 2.9% ;经 $300\ ^\circ\text{C}\times 2\ \text{h}$ 退火处理导致合金的抗拉强度和伸长率下降了 28.2% 和 22.3% 。ZL114A 铝合金经过退火处理后其抗拉强度均降低,且 $300\ ^\circ\text{C}$ 退火态尤为明显,抗拉强度仅为 $228.4\ \text{MPa}$;经 $230\ ^\circ\text{C}\times 2\ \text{h}$ 退火处理后 ZL114A 铝合金伸长率得到了一定的提升,但 $300\ ^\circ\text{C}$ 退火处理后合金的伸长率严重下降。

经 $230\ ^\circ\text{C}\times 2\ \text{h}$ 退火后合金伸长率提高,是因为退

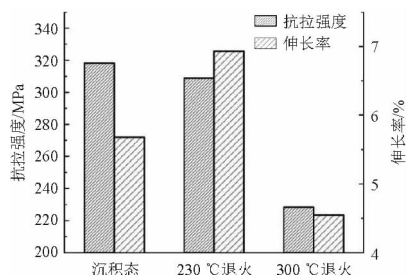


图 5 ZL114A 铝合金沉积态与退火态的力学性能

Fig.5 Mechanical properties of SLM-formed ZL114A alloy in deposited and annealed states

火态组织为细小的等轴晶组织,且各元素在组织中分布均匀,有利于金属试样的变形,使金属试样的伸长率增大。经 $300\ ^\circ\text{C}\times 2\ \text{h}$ 退火后合金伸长率减小,是因为组织中的弥散强化不足以抵抗孔洞等缺陷引起的组织变差,使试样变形能力减小。从沉积态与退火处理的 SLM 成形 ZL114A 铝合金的显微组织看出,Si 相分布均匀。但是经退火处理的试样显微组织有明显的变化,退火处理使 Si 相呈细长条状,连成片分布于 α -Al 边界。原本分散在 α -Al 基体与 Si 相交界处的微孔,聚集成成了更大尺寸的孔洞,使抗拉强度降低。

2.2.2 深冷处理对合金力学性能的影响

图 6 为深冷保温时间对 SLM 成形 ZL114A 铝合金力学性能的影响。随着保温时间增加,SLM 成形 ZL114A 铝合金的抗拉强度呈先下降、再上升后再下降趋势,总体变化不大,波动范围在 $20\ \text{MPa}$,其中深冷处理保温 $36\ \text{h}$ 时的抗拉强度最好为 $378.5\ \text{MPa}$ 。而伸长率随深冷保温时间的延长呈缓慢下降的趋势,深冷保温时间 $12\ \text{h}$ 的伸长率为 7.6% , $48\ \text{h}$ 时为 6.9% 。总体来说,深冷保温 $36\ \text{h}$ 时合金具有较好的综合力学性能,相较沉积态,其抗拉强度提高了 18.9% ,伸长率提高了 23.0% 。这是因为深冷处理导致发生体积收缩,使得 Al-Si 交界处的微形孔洞得以弥补缩合,从而力学性能得以改善。同时晶格中 Si 原子将大部分 Al 原子的位置占据,Si 在 Al 基体中过饱和固溶,产生了大量的晶

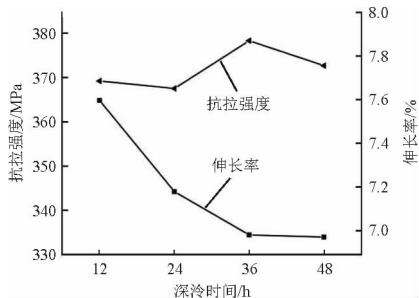


图 6 不同深冷时间下 SLM 成形 ZL114A 铝合金的力学性能

Fig.6 The mechanical properties of SLM-formed ZL114A alloy under various cryogenic time

格畸变,对 ZL114A 铝合金试样整体起到固溶强化作用,同时晶粒尺寸细小,晶界所占的面积就越大,大量晶界存在,晶界对滑移阻碍作用更明显,即存在明显的细晶强化作用;同时,随着其晶界协调性增加,塑性也得到改善。

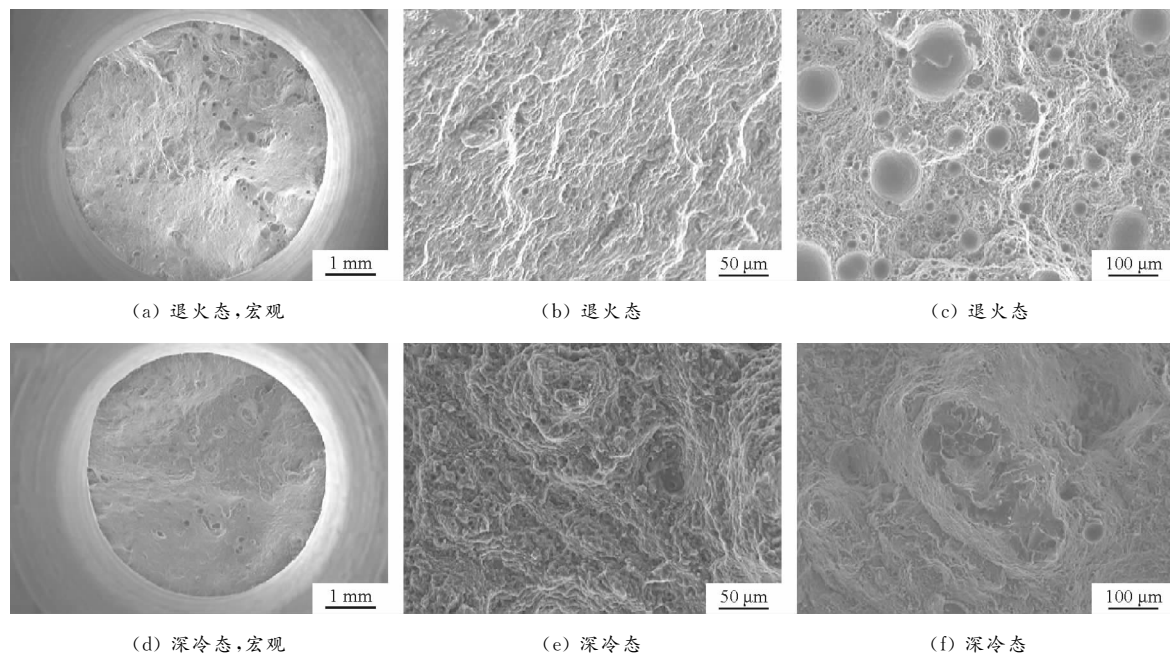


图 7 SLM 成形 ZL114A 铝合金退火态、深冷态组织缺陷

Fig.7 Microstructure defects of SLM-produced ZL114A alloy in annealed and cryogenic states

大小不等的圆形或椭圆形的凹坑-韧窝,表现为韧性断裂,并且断口处有大量不规则的韧窝,断口的韧窝尺寸较小较浅(见图 7c),表明断裂为韧性断裂。

从图 7d 可以看出,深冷态的 ZL114A 铝合金断口都呈纤维状,也存在明显的“颈缩”痕迹,同时还有许多大小不一的韧窝,呈典型的韧性断裂特征。断口的微观形态呈蜂窝状,相对于退火态,其韧窝尺寸较大较深,韧窝的数量也更多,见图 7e 和图 7f。

3 结 论

(1)退火处理对 SLM 成形 ZL114A 铝合金的力学性能有明显影响,经 $230\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ 退火处理后其抗拉强度为 308.8 MPa,伸长率为 6.9%;相比沉积态,抗拉强度稍有降低,但伸长率相比沉积态提高了 18.0%;而经 $300\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ 退火后,抗拉强度仅为 228.4 MPa,伸长率为 4.6%;退火态组织中 $\alpha\text{-Al}$ 相与 Si 相的交界处有大量的孔洞,这是造成力学性能降低的主要原因。

(2)深冷处理($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$)可以明显改善 SLM 成形的 ZL114A 铝合金的微观组织,深冷处理后 Si 以细棒状共晶 Si 的形式均匀分布在 $\alpha\text{-Al}$ 基体中,有利于组织细化。

2.3 合金退火态及深冷态的断裂机制

图 7 为 SLM 成形 ZL114A 铝合金退火态、深冷态试样拉伸后的断口形貌。从图 7a 可以看出,断口存在明显的“颈缩”现象。从图 7b 可以看出,其组织基本上呈现纤维状,几乎没有孔洞和未熔粉末,而有一些尺寸

(3)深冷处理($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$)对 SLM 成形 ZL114A 铝合金的力学性能有较为明显的提高,保温时间延长,其力学性能差别不大。深冷处理 36 h 的合金力学性能最好,其抗拉强度可达 378.5 MPa,伸长率为 7.0%。

参 考 文 献

- [1] 贺晓军,何智勇,刘洋,等. 铸造铝合金 ZL114A 的热处理工艺[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(3): 92-94.
- [2] 康福伟,李如一,乔昕,等. 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.
- [3] 刘伟国,龙文元,王东成. Cu 对 ZL114A 合金组织与力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(9): 1 006-1 009.
- [4] WANG P, LI H C, PRASHANTH K G, et al. Selective laser melting of Al-Zn-Mg-Cu: Heat treatment, microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 707: 287-290.
- [5] SPIERINGS A B, DAWSON K, KERN K, et al. SLM-processed Sc and Zr- modified Al-Mg alloy: Mechanical properties and microstructural effects of heat treatment[J]. Materials Science & Engineering, 2017, A701: 264-273.
- [6] 孙闪闪,滕庆,程坦,等. 热处理对激光选区熔化 GH3536 合金组织演变规律的影响研究[J/OL]. 机械工程学报,网络首发, 1-11.
- [7] 刘志权,尹家新,徐志锋,等. ZL114A 铝合金激光选区熔化成形工艺[J]. 铸造, 2018, 67(11): 961-967.
- [8] 甘武奎,彭金贵,李仕豪,等. 铝合金选区激光熔化精密成形及其在航空领域的应用[J]. 航空制造技术, 2019, 62(16): 53-63.

Al-Ti-C 中间合金在 ZL205A 合金石膏型铸造中的应用

牛经纬 张国伟
(中北大学材料科学与工程学院)

摘 要 通过对石膏型铸造 ZL205A 合金添加不同含量的 Al-Ti-C 中间合金,研究了 Al-Ti-C 中间合金对 ZL205A 合金组织和性能的影响。结果表明,当 Al-Ti-C 中间合金添加量为 0.7% 时,ZL205A 晶粒的细化效果最好,晶粒尺寸达到 82 μm 。经过 T5 处理,添加 0.7% 的 Al-Ti-C 中间合金的 ZL205A 合金的抗拉强度为 456 MPa,伸长率达到 8.2%,比未处理的 ZL205A 合金性能有了显著提升。

关键词 ZL205A 合金;Al-Ti-C 中间合金;熔模铸造;显微组织;力学性能

中图分类号 TG146.21;TG249.5 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.02.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Al-Ti-C Master Alloy on Microstructure and Properties of Plaster Mold Casting ZL205A Alloy

Niu Jingwei, Zhang Guowei
(School of Materials Science and Engineering, North University of China)

Abstract: The influence of different content Al-Ti-C master alloy on microstructure and properties of the plaster mold casting ZL205A alloy was investigated via metallographic analysis and tensile test. The results indicate that the grain refinement effect of ZL205A is desirable with 0.7% Al-Ti-C master alloy addition, which reaches 82 μm . After T5 treatment, the ultimate tensile strength and elongation of ZL205A alloy with 0.7% Al-Ti-C master alloy reach 456 MPa and 8.2%, respectively, of which the mechanical properties are improved significantly compared with those of normal plaster ZL205A alloy.

Key Words: ZL205A Alloy, Al-Ti-C Master Alloy, Plaster Casting, Microstructure, Mechanical Properties

ZL205A 合金因其密度小、强度高、模量大而被广泛应用于汽车、航空航天、船舶、军工等行业。ZL205A 合金是实现材料强韧化、轻量化,实现以铝代钢、以铸代锻的理想材料,经过 T5 时效的 ZL205A 合金的抗拉强度可超过 400 MPa^[1~3]。尽管 ZL205A 合金力学性能良好,但是由于结晶区间较宽,导致熔体流动性较差,容

易出现热裂、偏析等缺陷,限制了其应用范围^[4,5]。石膏型铸造可以改善铝液的流动性,提升充型能力,但由于石膏散热慢,往往导致铸件的力学性能较差。在此基础上,通过在 ZL205A 合金中添加不同含量 Al-Ti-C 中间合金来提升石膏型铸造 ZL205A 合金的力学性能,为石膏型铸造复杂 ZL205A 合金铸件提供参考。

收稿日期:2020-07-30;修改稿收到日期:2020-08-20
第一作者简介:牛经纬,男,1996 年出生,硕士研究生,太原(030051),E-mail:niukingway@163.com
通信作者:张国伟,男,1976 年出生,副教授,太原(030051),E-mail:1125593238@qq.com
引用格式:牛经纬,张国伟. Al-Ti-C 中间合金在 ZL205A 合金石膏型铸造中的应用[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(2):194-197.
NIU J W, ZHANG G W. Effects of Al-Ti-C master alloy on microstructure and properties of plaster mold casting ZL205A alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(2):194-197.

[9] 刘轩之,翁泽钜,王凯凯,等. 深冷处理对 7050 铝合金尺寸稳定性及断裂韧度的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(9): 103-107.

[10] 姜小坤,余欢,徐志锋,等. 退火及深冷处理对 2.5D-C_f/Al 复合材料残余应力及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(8): 900-904.

[11] 高文林,王向杰,陈军洲,等. 深冷处理对 7A99 铝合金峰值时效析出相的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(4): 1 155-1 160.

[12] 刘辉,张连勇,姜艳华. 深冷处理对 LC9 铝合金力学性能及摩擦因数的影响[J]. 金属热处理, 2013, 38(6): 86-88.

[13] BRICE C, SHENOY R, KRAL M, et al. Precipitation behavior of aluminum alloy 2139 fabricated using additive manufacturing[J]. Materials Science & Engineering, 2015, A648: 9-14.

[14] 余开斌,刘允中,杨长毅. 热处理对选区激光熔化成形 AlSi10Mg 合金显微组织及力学性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2018, 23(3): 298-305.

[15] 肖波. ZL114A 铝合金粉末的选区激光熔化成形工艺研究[D].南昌:南昌航空大学, 2017.

[16] 范耀强. ZL114A 合金热处理工艺研究[D].太原:中北大学, 2015.

(编辑:栗万仲)