

热处理对 SLM 成形 ZL205A 铝合金组织及性能的影响

陈云华 卢百平 李仕豪 余欢 汪志太
(南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室)

摘 要 探究 T6 固溶时间和时效时间对 SLM 成形 ZL205A 铝合金试样显微组织和力学性能的影响。结果表明,在 538 ℃下固溶时间从 10 h 增加到 14 h,150 ℃时效 4 h 时,合金中析出大量第二相 θ -Al₂Cu,且在 α -Al 基体中分布均匀,其抗拉强度由固溶 10 h 的 327 MPa 上升到固溶 14 h 的 369 MPa。固溶 14 h 时,随着时效时间延长,试样的力学性能呈现先上升后下降趋势,析出的 θ 相在 150 ℃×6 h 后出现变大,导致成形试样的力学性能下降。经固溶 14 h,时效 6 h 后,试样抗拉强度达到 388 MPa,屈服强度为 241 MPa,伸长率为 6.77%。经 538 ℃×14 h 固溶+150 ℃×6 h 时效后可获得较高的抗拉强度和伸长率。

关键词 选区激光熔化;ZL205A 铝合金;热处理;显微组织;力学性能

中图分类号 TP146.21;TG156.9;TG249

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.07.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Heat Treatment on Microstructure and Properties of ZL205A Alloy Fabricated by Selective Laser Melting

Chen Yunhua, Lu Baiping, Li Shihao, Yu Huan, Wang Zhitai

(National Defence Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University)

Abstract: The effects of solid solution time and aging time on the microstructure and mechanical properties of ZL205A alloy specimens was investigated at T6 state formed by selective laser melting (SLM). The result indicate that when the solution time is increased from 10 h to 14 h with the aging time of 4 h, the solid solubility is increased and a large amount of the second θ -Al₂Cu phases are precipitated and uniformly distributed in the α -Al substrate, where the tensile strength is increased from 327 MPa to 369.26 MPa. With the aging time increasing gradually, the mechanical properties of the specimens present a trend of rising firstly and then declining. The precipitated θ phase becomes larger after aging for 6 h, resulting in the decline of the mechanical properties of the formed specimens. After solid solution for 14 h and aging for 6 h, the tensile strength, yield strength and the elongation reach 387.84 MPa, 241 MPa and 6.77%, respectively. Therefore, the desirable tensile strength and elongation can be obtained by solid solution at 538 ℃ for 14 h and aging at 150 ℃ for 6 h.

Key Words: Selective Laser Melting, ZL205A Alloy, Heat Treatment, Microstructure, Mechanical Properties

随着激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术的快速发展和逐渐成熟,铝合金的 SLM 成形相关研究已成为研究热点^[1~3]。铝合金因具有比强度高、耐腐蚀和导热导电性能良好等特点,在航空航天增材制造领域发展潜力巨大^[4,5]。SLM 成形过程中,由于成形快热快冷的特点,造成试样内部温度梯度大、残余应力集中,试样易产生热裂纹、孔洞等缺陷,最终影响成形试样的力学性能^[6]。热处理是调控 SLM 成形试样显微组织和力学性能的重要手段之一。LI W 等^[7]研

究了固溶时效处理对 SLM 成形 AlSi10Mg 合金力学性能的影响,发现通过控制固溶温度使 SLM 成形 Al-Si10Mg 合金试样具有更好的拉伸性能和显微硬度,通过固溶时效热处理可以使试样伸长率从 4% 提高到 25%。刘焕文等^[8]研究了热处理对 SLM 成形 Al-Si10Mg 合金力学性能和组织的影响,热处理后其力学性能优于 ZL104 和 LD2 合金。袁广辰等^[9]研究了 T6 处理对 SLM 成形 AlSi10Mg 合金组织和力学性能的影响,发现 T6 处理后,AlSi10Mg 合金的抗拉强度和屈服

收稿日期:2020-11-20;修改稿收到日期:2020-12-30
基金项目:轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室开放课题研究基金资助项目(EG201903173)
第一作者简介:陈云华,男,1994 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:1421705053@qq.com
通信作者:卢百平,男,1971 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:lbp029@163.com
引用格式:陈云华,卢百平,李仕豪,等. 热处理对 SLM 成形 ZL205A 铝合金组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(7):905-909.
CHEN Y H, LU B P, LI S H, et al. Effects of heat treatment on microstructure and properties of ZL205A alloy fabricated by selective laser melting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(7):905-909.

强度都发生了明显的下降,但伸长率显著提升。以上研究结果表明,热处理工艺可以有效改善 SLM 成形铝合金的组织 and 力学性能。

ZL205A 铝合金由于其较好的综合力学性能、抗应力腐蚀性和机加工性能,进而被广泛应用于飞机、导弹、船舶等国防军工产品^[10,11]。但由于 Al-Cu 合金成分复杂,结晶温度范围宽,在凝固过程中易产生热裂纹、柱状晶缺陷等原因,使得合金的综合铸造性能难以满足服役要求^[12]。研究表明,经热处理后,ZL205A 铝合金的抗拉强度超过 450 MPa,伸长率达到 13%^[13],是发展高性能 ZL205A 铝合金的重要工艺之一。本课题研究了热处理工艺(固溶/时效)对 SLM 成形 ZL205A 铝合金沉积态试样显微组织、物相分布、力学性能和断口形貌的影响,旨在为 ZL205A 铝合金的应用提供参考。

1 试验材料与方法

试验用 ZL205A 铝合金粉末通过气雾法制备,粉末粒径在 15~45 μm 范围内,其化学成分见表 1。利用 Nova Nano SEM450 型场发射扫描电镜以及 D8ADVANCE-A25 型 X 射线衍射仪进行显微组织观察和物相分析,其粉末状态见图 1。SLM 成形采用 SLM300 设备,其中 YLR-500-WC 型光纤激光器最大功率为 500 W、波长为 1 070 nm;采用双向刮刀铺粉,激光扫描方式为三维动态振镜聚焦,成形缸最大成形尺寸为 300 mm(X)×250 mm(Y)×250 mm(Z),SLM 成形优化工艺参数见表 2。

采用的热处理工艺为:在 538 ℃ 下分别固溶 10、12、14 h 后水冷,然后在 150 ℃ 下分别时效 4、6、8 h 后

表 1 ZL205A 铝合金粉末的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZL205A alloy powders %						
w _B						
Cu	Mn	Ti	Cd	V	Zr	Al
4.6~5.3	0.3~0.5	0.15~0.35	0.15~0.3	0.05~0.3	0.05~0.2	余量

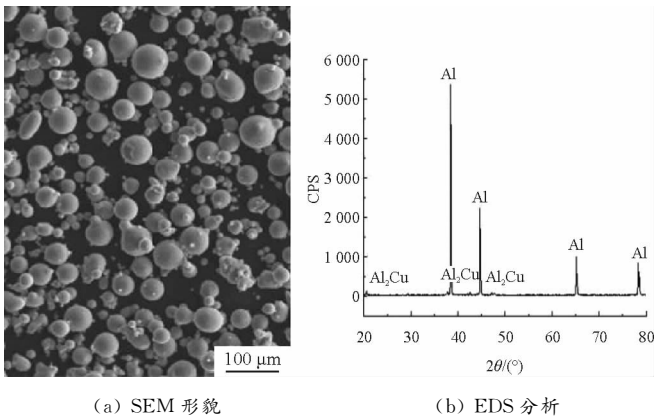


图 1 ZL205A 铝合金粉末的 SEM 形貌和物相分析
Fig.1 SEM morphology and EDS analysis of ZL205A alloy powders

表 2 SLM 成形工艺参数

Tab.2 Parameters of SLM forming process

激光功率/W	扫描速度/(mm·s ⁻¹)	扫描间距/mm	铺粉厚度/mm
450	1 300	0.08	0.05

水冷。

SLM 成形的拉伸试样见图 2。采用 Instron 5569 电子拉伸试验机拉伸,拉伸方向平行于堆积成形方向,拉伸速率为 1 mm/min。采用 Quanta 200 型环境扫描电镜观察断口形貌,将打磨及抛光好的块状试样进行腐蚀,腐蚀液的配比为 2 mL 的 HF+3 mL 的 HCl+5 mL 的 HNO₃+90 mL 的 H₂O。用 Nova Nano SEM 450 型的场发射扫描电镜及其自带的 EDS 能谱仪观察其微观组织及元素分布。

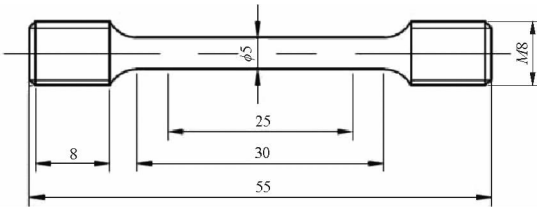


图 2 SLM 成形的拉伸试样

Fig.2 Tensile specimens formed by SLM

2 试验结果与分析

2.1 热处理对 ZL205A 铝合金组织的影响

图 3 为 SLM 成形 ZL205A 铝合金不同热处理状态下的显微组织。可以看出,随着固溶时间增加,试样组织表面的第二相 θ-Al₂Cu 逐渐析出且变得细小,当固溶时间达到 14 h 时,细小球状 θ 相均匀弥散的分布在 α-Al 基体中且大小在 1 μm 左右。这是因为随着固溶时间的增加,在消除残余应力的同时,Cu 元素在 α-Al 基体中的溶解逐渐上升至过饱和,随着时效的进行,使在 α-Al 基体中过饱和的 Cu 原子以 θ-Al₂Cu 相形式析出,Cu 原子的尺寸为 0.145 nm,比 Al 原子的 0.142 nm 要大,使原始晶体结构受到干扰,导致位错滑移受到阻碍,最终形成过饱和固溶体,固溶时间达到临界点 14 h 时,使试样组织成分分布均匀,由此可知,在相同的固溶温度下,固溶时间越长,固溶强度增加,试样组织分布越均匀。

图 4 为 SLM 成形 ZL205A 铝合金试样在经 538 ℃×14 h 固溶后,不同时效时间下的组织。可以看出,时效 6 h 时,析出相数量达到最大,位错个数下降,使应力集中减小,当时效时间增加到 8 h 时,发现晶粒相互合并现象,使晶粒变大分布混乱,最终导致细晶强化效果减弱。由此可知,时效时间可使时效强化增强,超过时效 6 h 时,弥散强化效果减弱。

沈振菊^[14]研究发现,2 系铝合金在均匀化过程中会

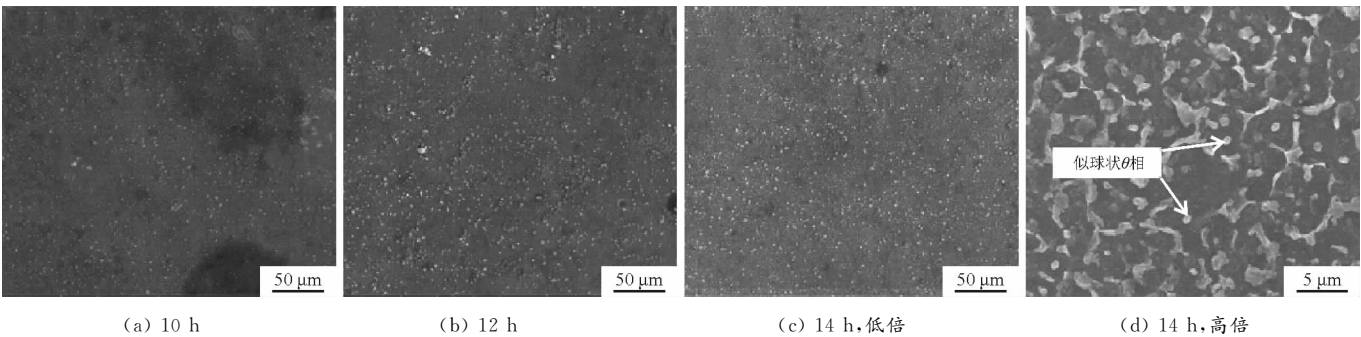


图 3 在 538 °C 下固溶不同时间+150 °C×4 h 时效处理后 SLM 成形 ZL205A 试样 SEM 图
Fig.3 SEM images of ZL205A alloy specimens formed by SLM during different solid solution time at 538 °C and aging at 150 °C for 4 h

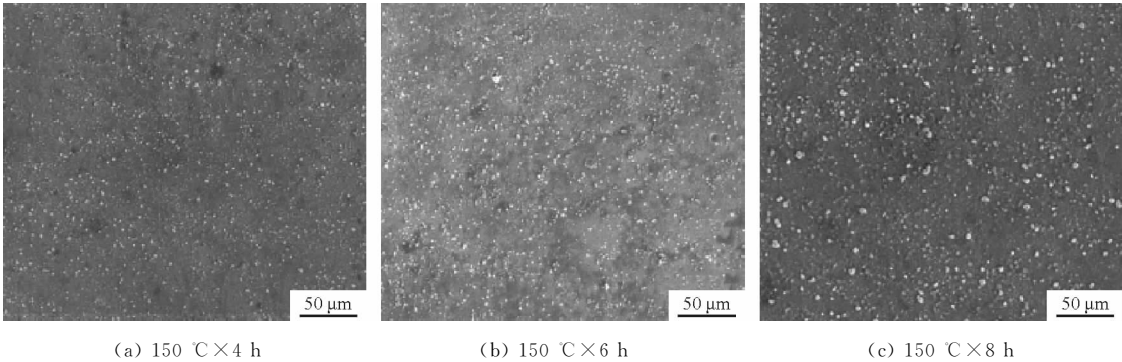


图 4 538 °C 固溶 14 h 后不同时效时间下 SLM 成形 ZL205A 试样 SEM 图

Fig.4 SEM images of ZL205A alloy specimens formed by SLM with solid solution at 538 °C for 14 h during different aging time

产生常见的长棒状 $T\text{-Al}_{12}\text{CuMn}_2$ 相,在后期的热处理中不会消失。图 5 为 SLM 成形 ZL205A 铝合金试样经 538 °C×12 h+150 °C×6 h 处理后的 SEM 形貌和 EDS 分析。发现在区域内 Mn 的质量分数为 19.60%。可以看出,在该区域内除了圆球状 θ 相之外,还有一个针状析出相出现,有可能就是 $T\text{-Al}_{12}\text{CuMn}_2$ 相,但由于析出相太少,在组织区域内并未找到其余的 T 相, T 相的析出提高了试样的高温力学性能。

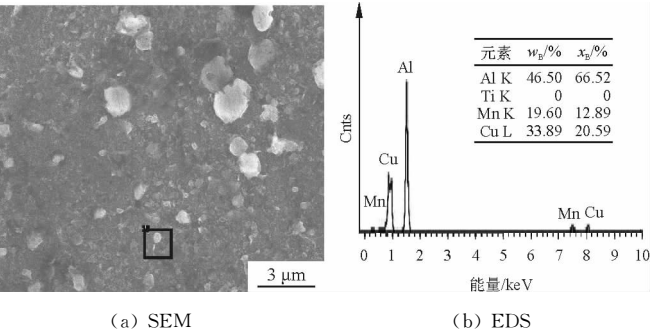


图 5 538 °C×12 h 固溶+150 °C×6 h 时效试样 EDS 图
Fig.5 EDS images of specimens after solid solution at 538 °C for 12 h and aging 150 °C for 6 h

图 6 为经过热处理的 SLM 成形 ZL205A 铝合金试样的 XRD 图。可以看出, $T\text{-Al}_{12}\text{CuMn}_2$ 相在热处理过程中均存在,只是析出量少,导致其所对应的衍射峰相对较小,证实了图 5 中长棒状析出相为 T 相的结论。随着处理时间增加,第二相 $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ 含量出现先变大后

减小现象,由此可知,固溶时间和时效时间均对第二相的析出有促进作用。

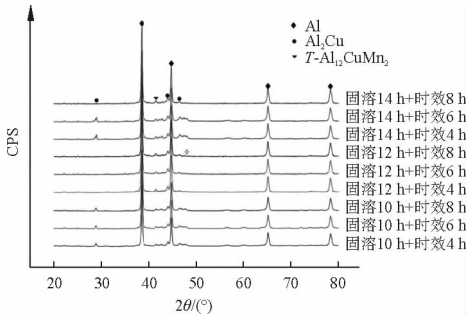


图 6 热处理下 SLM 成形试样的 XRD 图
Fig.6 XRD patterns of specimens formed by SLM after heat treatment

2.2 热处理对 ZL205A 铝合金力学性能的影响

图 7 为 SLM 成形 ZL205A 铝合金试样经不同固溶时间再时效 4 h 后的力学性能。可以看出,经过热处理后试样的力学性能均比沉积态有较大提高,抗拉强度和屈服强度相对沉积态的提高了 42.6%和 21.8%。随着固溶时间增加,试样的力学性能呈现上升趋势,抗拉强度和屈服强度由固溶 10 h 的 327 MPa 和 225 MPa 上升到固溶 14 h 的 369 MPa 和 253 MPa,分别提升了 12.9%和 12.5%,但试样的抗拉强度在固溶 12 h 以后趋于平稳,伸长率则跟固溶时间成正比关系,由固溶 10 h 的 6.2%上升到固溶 14 h 的 6.9%,上升了 11.3%。

固溶时间的增加导致力学性能明显提高,主要是因为溶入固溶体中的 Cu 原子不断增加,造成了晶格畸变,增加了位错运动的阻力,使位错滑移难以进行,从而使试样的强度增加。

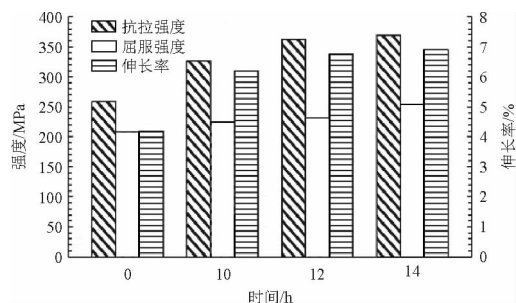


图 7 不同固溶时间再时效 4 h SLM 成形 ZL205A 铝合金试样的力学性能

Fig.7 Mechanical properties of ZL205A alloy specimens formed by SLM during different solid solution time and aging for 4 h

图 8 为经 $538\text{ }^{\circ}\text{C}\times 14\text{ h}$ 固溶后在不同时效时间下 SLM 成形 ZL205A 铝合金试样的力学性能。可以看出,热处理后力学性能均比沉积态要好,随着时效时间增加,试样的抗拉强度和屈服强度呈先升后降的趋势,由时效 4 h 的 369 MPa、232 MPa 上升到时效 6 h 的 388 MPa、241 MPa 最后下降到时效 8 h 的 318 MPa、220 MPa,而伸长率与时效时间呈现反比关系,由时效 4 h 的 6.9% 一直下降到时效 8 h 的 6.6%,下降了 4.5%。由此可知, $538\text{ }^{\circ}\text{C}\times 14\text{ h}$ 固溶 + $150\text{ }^{\circ}\text{C}\times 6\text{ h}$ 时效是

SLM 成形 ZL205A 铝合金试样的最佳热处理工艺。

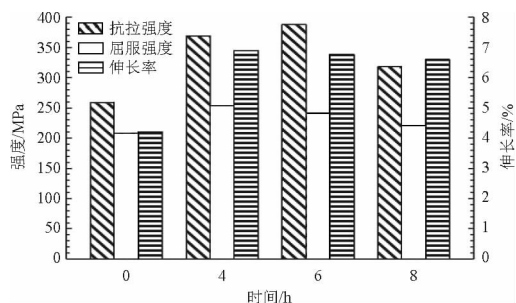


图 8 经 $538\text{ }^{\circ}\text{C}\times 14\text{ h}$ 固溶后不同时效时间下 SLM 成形 ZL205A 铝合金试样的力学性能

Fig.8 Mechanical properties of ZL205A alloy specimens formed by SLM with solid solution at $538\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 14 h during different aging time

2.3 热处理对 ZL205A 铝合金断口形貌的影响

图 9 为不同热处理时间下 SLM 成形 ZL205A 铝合金室温拉伸断口形貌。可以看出,经过热处理后试样的断口均存在滑移特征以及面积大小不一的韧窝,由此可判断其断裂机制为韧性断裂。从图 9a~图 9c 看出,当固溶时间上升,韧窝尺寸和气孔数量逐渐下降,滑移现象减少;从图 9c~图 9e 可以看出,随着时效时间增加,韧窝尺寸先减小后变大,在时效 6 h 时,大小相同的韧窝密集分布在断口表面,这说明试样的力学性能较好。在这些韧窝底部均发现了析出相颗粒,见图 9f,析出相大幅提高了试样的综合性能。

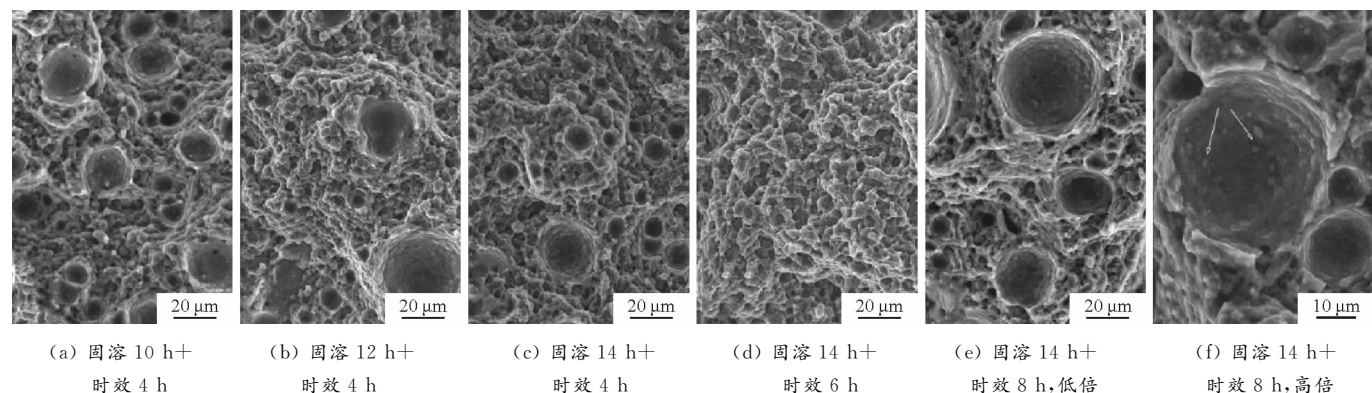


图 9 不同热处理工艺下 SLM 成形 ZL205A 试样断口形貌 SEM 图

Fig.9 SEM images of fracture morphology of ZL205A alloy specimens formed by SLM after different heat treatment

3 结 论

(1) SLM 成形 ZL205A 铝合金经 $538\text{ }^{\circ}\text{C}\times (10、12、14)\text{ h}+150\text{ }^{\circ}\text{C}\times (4、6、8)\text{ h}$ 固溶时效后,试样组织中均有少量的棒状 $T\text{-Al}_{12}\text{CuMn}_2$ 相析出,随着固溶时间从 10 h 增加到 14 h 时(再时效 4 h 后),固溶度变大,第二相 $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ 大量析出且出现再结晶现象,晶粒在 $\alpha\text{-Al}$ 基体中分布均匀;在固溶 14 h 时,当时效时间逐渐增加,析出的晶粒在 6 h 后出现变大现象,减少了细化晶

粒效果,导致成形试样的力学性能下降。

(2) SLM 成形 ZL205A 铝合金经 $538\text{ }^{\circ}\text{C}\times (10、12、14)\text{ h}+150\text{ }^{\circ}\text{C}\times (4、6、8)\text{ h}$ 固溶时效后的抗拉强度、屈服强度和伸长率均明显高于沉积态的,固溶 14 h + 时效 6 h 时,抗拉强度达到最大,屈服强度和伸长率均增加,是 SLM 成形 ZL205A 铝合金试样热处理的最佳处理工艺。

(3) SLM 成形 ZL205A 铝合金经 $538\text{ }^{\circ}\text{C}\times (10、12、14)\text{ h}+150\text{ }^{\circ}\text{C}\times (4、6、8)\text{ h}$ 固溶时效后试样的断口均

差压铸造铝合金长臂件力学性能不稳定的原因分析

赵 洁 朱宇瑾 陈 耘 张立君
(中国兵器科学研究院宁波分院)

摘 要 针对差压铸造 A356 铝合金长臂件存在力学性能不稳定的问题,通过金相组织和拉伸试样断口形貌观察,对其产生原因进行了分析。结果表明,A356 合金经过精炼、变质和细化处理,其金相组织正常,晶粒细化,气孔和氧化夹杂很少,力学性能稳定;长臂件最外端的厚度较大部位,因铸型温度控制不当,该部位的铝合金液在无补缩压力下凝固和结晶时出现疏松缺陷,最终导致其力学性能不稳定。

关键词 差压铸造;铝合金长臂件;金相组织;断口形貌

中图分类号 TG249.2;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.07.024 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Analysis on the Origination of Unstable Mechanical Properties of Differential Pressure Casting Aluminum Alloy Long Arm Parts

Zhao Jie, Zhu Yujin, Chen Yun, Zhang Lijun
(Ninngbo Branch, Chiense Ordnance Science Research Academy)

Abstract: Aiming at the problem of unstable mechanical properties of the differential pressure casting aluminum alloy long arm parts, the origination was analyzed through the observation of the microstructure and the fracture morphology of the tensile specimen. The results reveal that after refining, modification and grain refinement treatments, the A356 alloy for aluminum alloy long arm parts shows normal microstructure with refined grains, few blowholes and a small amount of oxide inclusions, which have little effect on its instability of mechanical properties. However, with non-proper mold temperature, the porosities are the main cause for the unstable mechanical properties, which appear when the aluminum alloy liquid is solidified and crystallized under absence of feeding pressure at the thicker part of the outermost end of the aluminum alloy long arm.

Key Words: Differential Pressure Casting, Aluminum Alloy Long Arm, Microstructure, Fracture Morphology

收稿日期:2020-11-18;**修改稿收到日期:**2021-03-12
第一作者简介:赵洁,女,1984 年出生,副研究员,浙江宁波(315000),E-mail:zj19850105@126.com
引用格式:赵洁,朱宇瑾,陈耘,等. 差压铸造铝合金长臂件力学性能不稳定的原因分析[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(7):909-912.
ZHAO J, ZHU Y J, CHEN Y, et al. Analysis on the origination of unstable mechanical properties of differential pressure casting aluminum alloy long arm parts[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(7):909-912.

存在面积大小不一的韧窝,断裂机制为韧性断裂。固溶 14 h+时效 6 h 时,大小相同的韧窝密集分布在断口表面,且韧窝底部均发现了强化性能的析出相颗粒,故其综合性能最佳。

参 考 文 献

[1] 王霄,王东生,高雪松,等.轻合金构件激光增材制造研究现状及其发展[J].应用激光,2016,36(4):478-483.

[2] LI X P, WANG X J, SAUNDERS M, et al. A selective laser melting and solution heat treatment refined Al-12Si alloy with a controllable ultrafine eutectic microstructure and 25% tensile ductility[J]. Acta Materialia, 2016(10): 10-14.

[3] 田宗军,顾冬冬,沈理达,等.激光增材制造技术在航空航天领域的应用与发展[J].航空制造技术,2015,48(11):38-42.

[4] 舒群,陈玉勇,徐丽娟.砂型铸造 ZL205A 合金组织与力学性能的研究[J].特种铸造及有色合金,2005,25(2):75-78,61.

[5] 戴圣龙.先进航空铝合金材料与应用[M].北京:国防工业出版社,2012.

[6] 赵剑峰,谢德巧,梁绘昕,等.金属增材制造变形与残余应力的研究

现状[J].南京航空航天大学学报,2019,51(1):1-6.

[7] LI W, LI S, LIU J, et al. Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism[J]. Materials Science & Engineering, 2016, A663:116-125.

[8] 刘焕文,郑超,陈素明.热处理对激光选区熔化 AlSi10Mg 合金力学性能与组织的影响[J].特种铸造及有色合金,2020,40(5):523-525.

[9] 袁广辰,卢云,郑学儒.T6 热处理对选择性激光熔化 AlSi10Mg 合金组织和力学性能的影响.热加工工艺,2020(10):1-6.

[10] 戴圣龙.先进航空铝合金材料与应用[M].北京:国防工业出版社,2012.

[11] DUTTA B, FROES F H. The additive manufacturing (AM) of titanium alloys[J]. Metal Powder Report, 2016(72):96-106.

[12] 刘志权,余欢,徐志锋,等.选区激光熔化成形 ZL205A 合金工艺及性能研究[J].特种铸造及有色合金,2019,39(4):370-373.

[13] 贾洋江,陈邦峰. ZL205A 高强铸造铝合金的性能及应用[J].轻合金加工技术,2009,37(11):10-12,55.

[14] 沈振菊.铝合金中 T 相、θ'相的显微结构及演化[D].杭州:浙江大学,2016.

(编辑:刘卫)