

电弧增材制造 ZL114A 铝合金的组织与性能

李承德¹, 顾惠敏¹, 王伟², 翟玉春^{1,3}, 明珠², 王帅¹, 任玲玲¹, 王振彪³

(1. 东北大学, 辽宁 沈阳 110004)

(2. 中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103)

(3. 抚顺东工冶金材料技术有限公司, 辽宁 抚顺 113200)

摘要: 采用金相显微镜、扫描电镜、电子万能试验机等分析测试手段, 研究了电弧增材制造工艺方法(wire arc additive manufacturing, WAAM)对 ZL114A 铝合金组织与性能的影响。与传统铸造成形方法相比, 铸态组织具有更小的枝晶间距、Si 相细小分布均匀; 化学成分可有效控制; T6 热处理后, Si 相球化充分, 第二相弥散分布在 α -Al 基体上, 力学性能显著提升, 抗拉强度、屈服强度及延伸率分别为 360 MPa、315 MPa、7.5%, 延伸率是砂型铸造试样的 2.1 倍, 拉伸断口呈现韧性断裂特征。WAAM 成形试样缺陷主要为小于 30 μm 的气孔, 经过热处理后气孔数量减少, 尺寸有变大趋势。

关键词: 电弧增材制造(WAAM); 铝合金; 组织与性能; 缺陷

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)09-2917-06

ZL114A 铝合金具有优良的铸造性能和加工工艺性能, 适用于铸造复杂形状的高强度铸件, 目前已广泛的应用于航空、航天和军工等领域^[1,2]。铸造工艺和环境因素等对铸件的质量影响很大且不易控制^[3,4], 铸件容易产生缩孔、疏松、针孔、偏析、组织不均匀及晶粒粗大等缺陷, 造成铸件力学性能偏低和不均匀。

电弧增材制造(WAAM)是利用电弧热量将金属丝材快速熔化再冷却的过程, 合金凝固过程中具有极大的冷却速率, 获得的堆积体具有细小均匀的微观组织, 堆积过程即为产品制造过程。因此, 采用 WAAM 工艺制备的结构件产品能够避免组织不均匀及晶粒粗大等问题, 现已成为高内部质量金属部件低成本快速成形方法之一^[5]。近年来, 对铝合金电弧增材制造的研究主要集中在变形铝合金, 例如 2219、5A06、5B06、5087 等^[6-15]。本实验对 WAAM ZL114A 的微观组织、缺陷和力学性能做研究, 结果可为 ZL114A 电弧增材制造进一步研究提供试验依据和数据参考。

1 实验

采用抚顺东工冶金材料技术有限公司生产的 $\Phi 1.2$ mm ER4220 (Q/FSDG002-2018) 金属丝材进行 WAAM ZL114A 成形试验, ER4220 化学成分如表 1 所示; 基板为 6061-O 铝合金板, 尺寸 250 mm \times 150 mm

$\times 10$ mm; 氩气选用 99.999% 高纯氩气。所选取的对比试样为 Sr 变质的单铸金属型、砂型 ZL114A 试棒(由沈阳铸造研究所提供), 化学成分如表 1 所示。

图 1 为试验用 WAAM 系统, 电源为 Fronius CMT Advanced 4000R。采用单道多层的堆积成形方法制备 ZL114A 铝合金堆积体, 过程如图 2 所示, 试验工艺参数如表 2 所示。

将对比试样与 WAAM 成形试样同时在精度为 ± 3 $^{\circ}\text{C}$ 的固溶炉及时效炉进行热处理, T4 热处理制度: 固溶温度 540 $^{\circ}\text{C}$, 固溶时间 12 h, 自然时效; T6 热处理制度: 固溶温度 540 $^{\circ}\text{C}$, 固溶时间 12 h, 时效温度 175 $^{\circ}\text{C}$, 时效时间 4 h。用水刀、带锯、线切割等切割工具在 WAAM 成形试样上截取拉伸试样及金相试样, 在对比试棒上截取金相试样。

表 1 原材料化学成分

Table 1 Chemical composition of raw materials ($\omega/\%$)

Element	Si	Mg	Ti	Sr	Fe	Be
ER4220	6.98	0.66	0.12	0.027	0.108	<0.0005
Metal mold test bar	6.87	0.58	0.132	0.028	0.122	0.03
Sand mold test bar	7.08	0.59	0.141	0.032	0.098	0.034

收稿日期: 2018-09-10

重点专项: 国家重点研发计划 (2018YFB1106300-5)

作者简介: 李承德, 男, 1984 年生, 博士生, 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110004, 电话: 024-83680960, E-mail: 15940599525@139.com

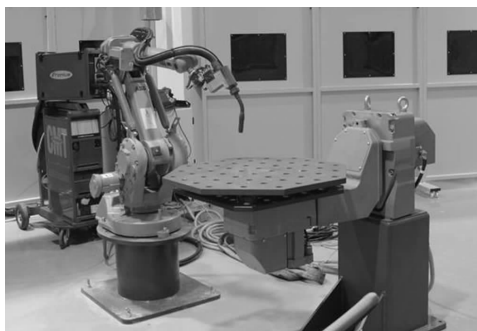


图 1 电弧增材制造系统
Fig.1 WAAM system

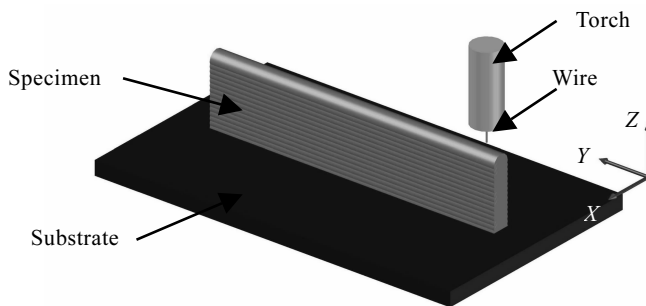


图 2 WAAM 成形原理示意图
Fig.2 Schematic diagram of forming principle

表 2 工艺参数

Table 2 Process parameters

Forming process	Wire feed speed/m·min ⁻¹	Travel speed/mm·s ⁻¹	Flow rate/L·min ⁻¹	Current/A	Voltage/V
CMT+Plus	6	10	25	120~130	20.4~21.4

表 3 WAAMZL114A 化学成分

Table 3 Chemical composition of WAAM ZL114A (ω/%)

Element	Si	Mg	Ti	Sr	Fe
National standard (GB/T1173-2013)	6.5~7.5	0.45~0.75	0.1~0.2	-	≤0.2
WAAM ZL114A	6.85	0.62	0.11	0.026	0.11

利用 FOUNDRY-MASTER Xpert 直读光谱仪分析化学成分；WDW-30 万能试验机进行拉伸性能测试；采用 CamScan-3400 型号扫描电子显微镜观察拉伸试样断口形貌及微观缺陷；使用 Kroll’s 试剂（2 mL 氢氟酸、6 mL 硝酸、92 mL 水）腐蚀试样，在 Axio Imager A2m 型金相显微镜下观察微观组织。

2 结果与讨论

2.1 堆积体化学成分

WAAM 成形试样的化学成分如表 3 所示。与原材料丝材 ER4220 相比，Si 含量降低了 1.8%，Mg 降低了 6.1%，在 WAAM 成形过程中，由于受到电弧高温作用，丝材中的 Si、Mg 产生了烧损，但其含量仍符合 ZL114A 标准要求。因此，需要严格控制原材料的 Si、Mg 含量，以保证 WAAM 成形试样的化学成分符合要求。

2.2 微观组织

WAAM 成形试样直接堆积态、金属型及砂型试棒铸态合金的金相组织如图 3a, 3e, 3i 所示。根据 Al-Si 二元合金相图，ZL114A 铝合金属于亚共晶合金，其凝固过程先析出初级 Al 枝晶，然后 Al-Si 共晶体在枝晶臂之间形成，铸态合金冷却过程中析出 Mg₂Si 和 Si 粒子。从图 3a 可以看出，WAAM 成形试样直接堆积

态的金相组织呈深灰色的共晶 Si 相以不规则颗粒状或短棒状分布在枝晶臂间；Mg₂Si 等析出物以小颗粒状弥散分布在堆积体中。与金属型（图 3e）及砂型（图 3i）试样相比，WAAM 成形试样具有更小的枝晶间距，共晶 Si 及 Mg₂Si 分散更加均匀。

经过固溶处理后，WAAM 成形试样中颗粒状或短棒状的共晶硅相发生了钝化和溶解，变得更加圆滑，第二相粒子溶解到 α-Al 基体中，如图 3b 所示。与固溶后的金属型（图 3f）、砂型（图 3j）试样相比，WAAM 成形试样 Si 相球化率明显提高，且分散均匀。

经过人工时效后，WAAM 成形试样中弥散析出了 Mg₂Si 相，球化硅相与析出的 Mg₂Si 相在 α-Al 基体上弥散分布（图 3c、3d），硅相与 Mg₂Si 相的能谱分析结果如图 4 所示。与金属型试样（图 3g、3h）及砂型试样（图 3k、3l）相比，WAAM 成形试样 Si 相趋于球状，且分散更均匀。

Al-Si 铸造合金的性能与强化相数量、分布，铝基体的晶粒尺寸及共晶硅大小、形貌、分布等因素密切相关^[16,17]。WAAM 过程为快熔快冷过程，具有极大的冷却速率，使得直接堆积态 WAAM 成形试样的 α-Al 初晶组织与铸态金属型和砂型相比，具有更小的一次枝晶间距（DAS）及二次枝晶臂间距（SDAS），大量

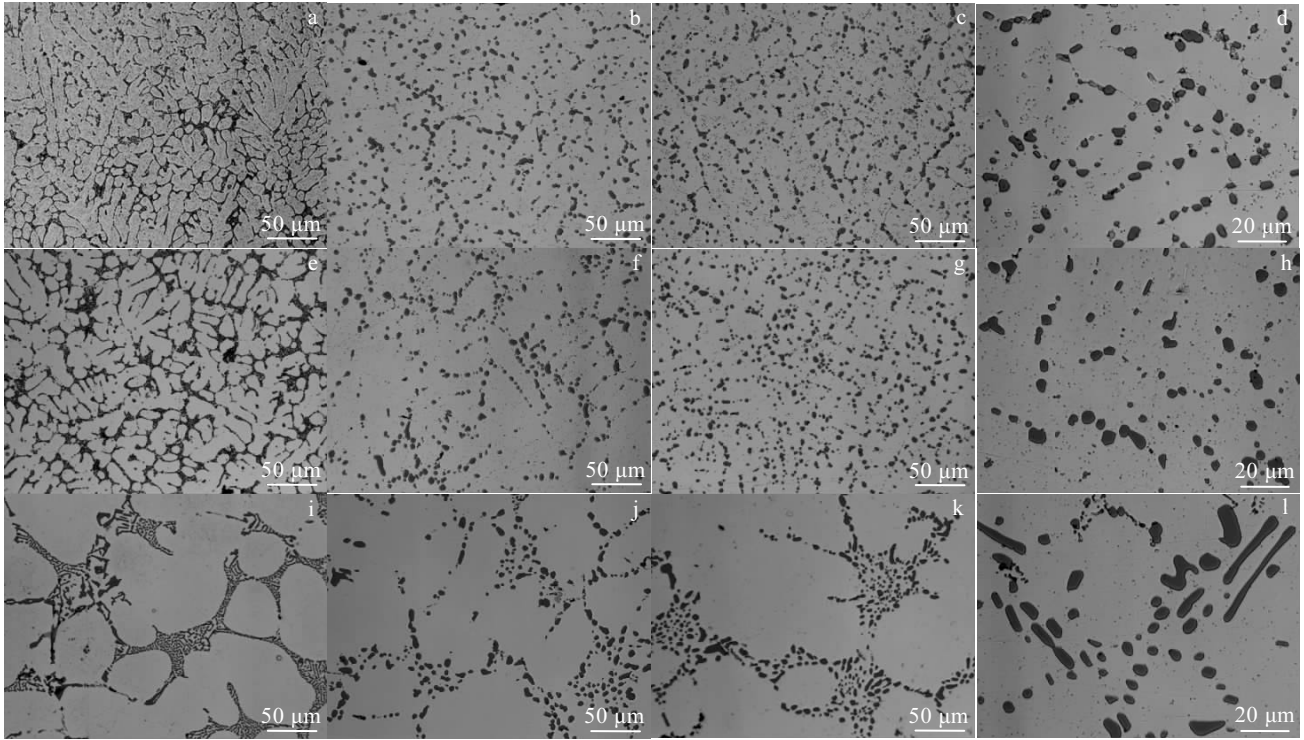


图 3 WAAM 及金属型、砂型 ZL114A 金相照片

Fig.3 OM images of ZL114A (a, b) as-deposited, T4 of WAAM, (c, d) T6 of WAAM; (e, f) as-cast, T4 of metal mold casting, (g, h) T6 of metal mold casting; (i, j) as-cast, T4 of sand casting, (k, l) T6 of sand casting

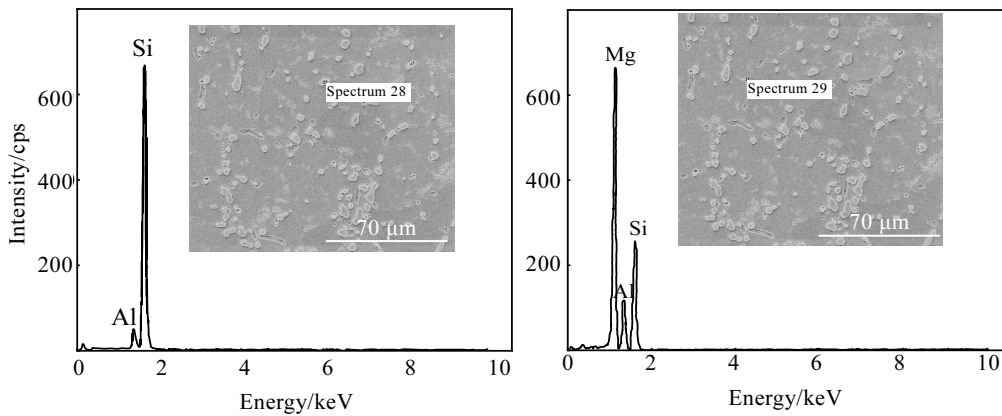


图 4 T6 热处理后 WAAM 成形试样的 SEM 及 EDS 分析

Fig.4 SEM images and EDS analysis of the WAAM ZL114A-T6

的第二相存在于枝晶臂间。SDAS 越小， Mg_2Si 、Si 等第二相粒子与 $\alpha-Al$ 接触的面积越大，在固溶阶段扩散、迁移的平均自由程越短，溶解的第二相粒子就越多，更易实现均匀化，在时效阶段能够析出大量起强化作用的过渡相，受到外力时位错移动所受阻力越大，使得合金具有更高的强度和韧性。经 T6 热处理的 WAAM 成形试样具有分布均匀的球化 Si 相，球状的 Si 颗粒周围的形变畸变能最小，应力集中程度最弱，

Si 相与基体相的协调最佳，使得合金在拉应力作用下的变形能以更协调的方式进行，裂纹不易萌生和传播，位错将会受到更大的阻碍。因而，WAAM 成形试样（T6）较金属型及砂型试棒表现出更优异的性能。

2.3 WAAM ZL114A 缺陷

铝合金具有严重的氧化和吸气倾向，在铝合金成形过程中极易吸气产生气孔类型缺陷^[18]。图 5a、5b、5c 分别为 WAAM 成形试样直接堆积态、T4 状态及 T6

状态合金的金相照片,图 5d 为气孔放大照片。直接堆积态、T4 态和 T6 态合金中均含有一定量的几十微米气孔,产生微气孔的原因是由于 WAAM 过程从熔化到凝固过程时间短,温度梯度大,氢在固、液态金属的溶解度差异大,在凝固过程中氢来不及溢出,从而在局部聚集成气孔。经过 T4 状态后,微气孔数量减少,尺寸有增大趋势,T6 状态与 T4 状态变化不明显。这是由于在固溶温度下,氢原子活性增大,逐渐汇集

到一起,造成了微气孔的数量减少,尺寸增大。

从图 5c、5d 可以看出 WAAM 成形试样气孔主要为分散球形的气孔缺陷,气孔的尺寸主要集中在 30 μm 以下。而金属型、砂型试样缺陷为集中的不规则形状疏松缺陷,缺陷大小在 200 μm 以上,如图 6 所示。由于球形缺陷不易产生应力集中点,这也是 WAAM 成形试样(T6)的力学性能高于金属型及砂型铸造的原因之一(力学测试结果见 2.4.1)。

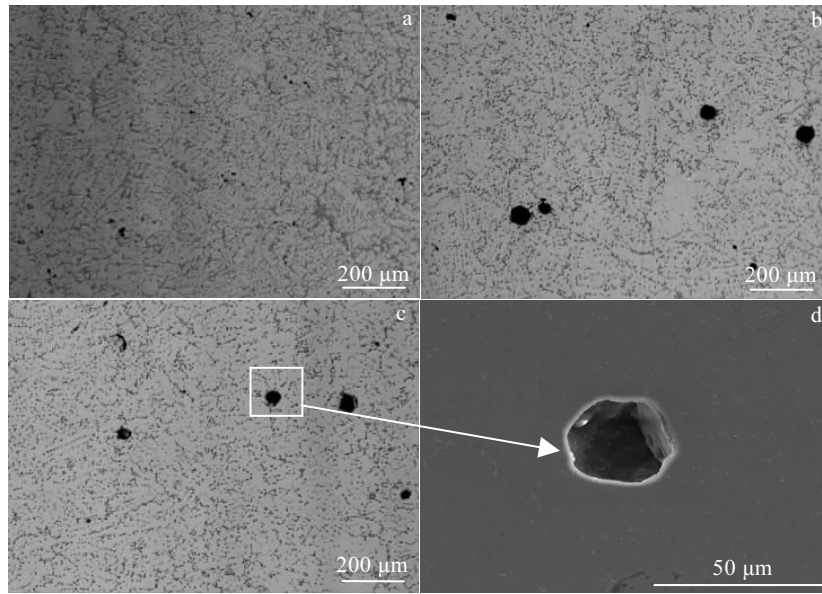


图 5 WAAM ZL114A 气孔缺陷及分布照片

Fig.5 Porosity and distribution of WAAM ZL114A: (a) as-deposited, (b) T4, (c) T6, and (d) SEM image of porosity

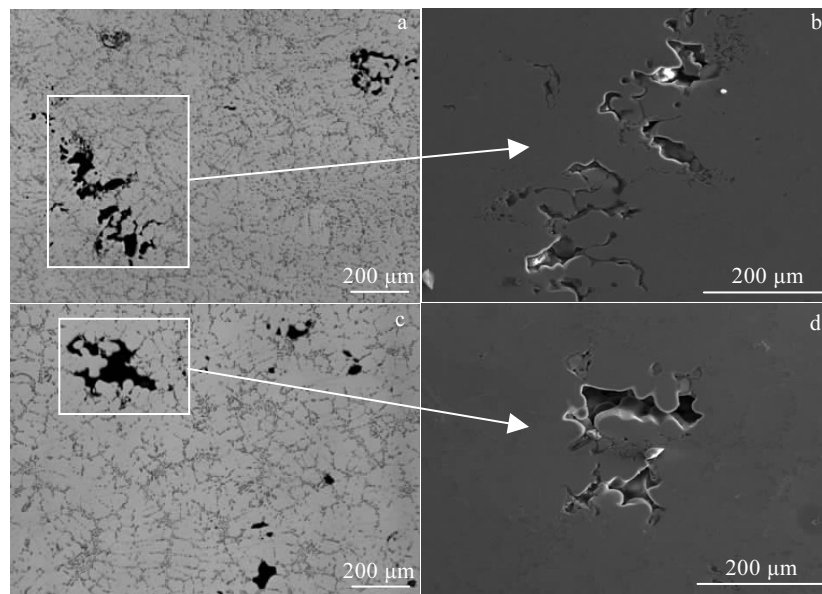


图 6 金属型铸造、砂型铸造试样缺陷分布照片

Fig.6 Defect distribution of metal mold casting (a, b) and sand casting (c, d) samples: (a, c) OM images and (b, d) SEM images

2.4 拉伸性能与断口形貌

2.4.1 拉伸性能

在进行力学性能测试之前，先对经 T6 热处理的 WAAM 成形试样及金属型、砂型试棒进行 X 射线透视检测，未发现宏观缺陷。由于 X 射线透视检测精度有限，图 5 中的微观疏松缺陷未检出，这些缺陷对抗拉强度、延伸率和疲劳性能有较大影响^[19-21]。各合金的平均力学性能测试结果如图 7 所示，可以看出 WAAM 成形试样的抗拉强度、屈服强度较金属型-T6 和砂型-T6 有所提高，抗拉强度为 360 MPa，屈服强度为 315 MPa；延伸率提高明显，是砂型铸造试样的 2.1 倍，为 7.5%。分析认为 WAAM 过程为快熔快冷过程，合金中共晶 Si 颗粒显著细小，在热处理过程中，硅相球化过程更容易进行，硅相球化后不宜产生应力集中点，体积明显减小，和 α -Al 基体连接更加紧密，能够承受更大的变形量，因此提升了力学性能，尤其是延伸率。

2.4.2 断口形貌

WAAM 成形试样 (T6) 的拉伸断口形貌如图 8a 所示。拉伸断口两侧组织分布均匀，试样断面为典型的韧窝状，且韧窝沿拉伸方向等轴分布，断口为 100% 韧窝型，与金属型试样断口相比 (图 8b)，韧窝密度及深度大，分布均匀。因此，具有更高的延伸率。

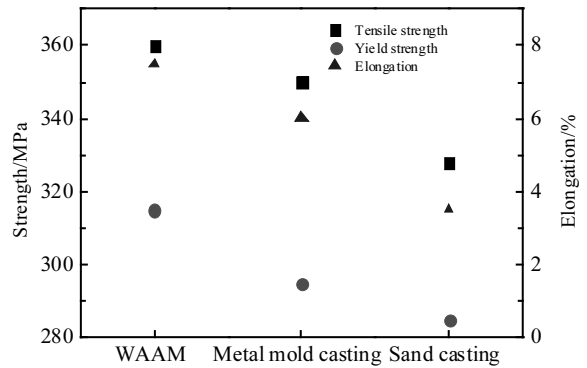


图 7 ZL114A-T6 不同成形方法的力学性能

Fig.7 Mechanical properties of different molding methods of ZL114A-T6

金属型试样拉伸断口如图 8b 所示，断口处有大量韧窝及少量解理面，说明金属型试样的断裂为韧性断裂，在断口处发现有二次裂纹，在二次裂纹周围发现有孔洞存在，见图 8b 中 A 处。砂型断口如图 8c 所示，可清楚的看到少量韧窝和解理面，其断裂形式为韧性断裂，且可观察到缩孔、氧化膜等缺陷，同样发现二次裂纹，在二次裂纹周围发现有缺陷存在，如图 8c 中 B 处。

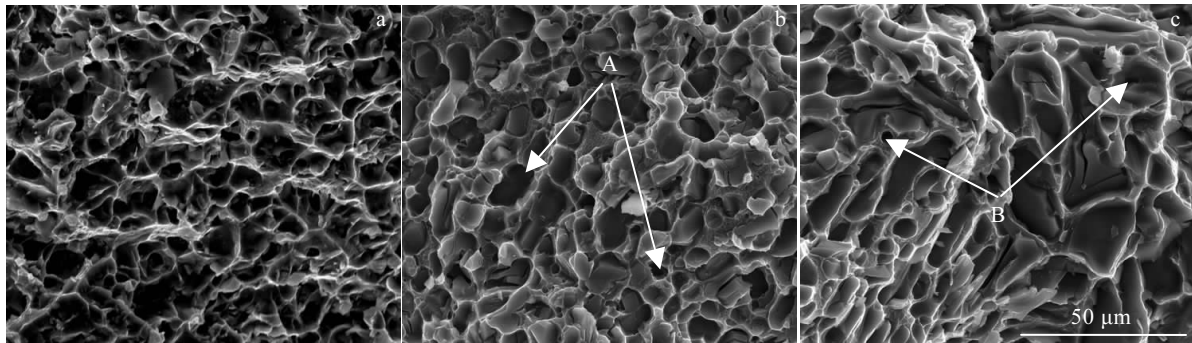


图 8 T6 状态 3 种成形方法的 ZL114A 拉伸断口 SEM 照片

Fig.8 SEM images of ZL114A tensile fracture: (a) WAAM, (b) metal mold casting, and (c) sand casting

3 结论

- 1) WAAM 成形试样中的 Si、Mg 含量在成形过程中略有烧损，合金组分符合标准要求。
- 2) WAAM 成形过程是熔滴的快熔快冷过程，初晶组织及硅相细小且分布均匀，经热处理后，硅相球化率高，呈弥散分布。
- 3) WAAM 成形试样缺陷主要为分散均匀的球形气孔，经过热处理后，气孔数量减少，尺寸有增大趋势，主要集中在 30 μm 以下。

势，主要集中在 30 μm 以下。

- 4) 经 T6 热处理 WAAM 成形试样的抗拉强度、屈服强度和延伸率分别为 360 MPa、315 MPa 和 7.5%，延伸率是砂型铸造试样的 2.1 倍。拉伸断口为韧性断裂，断口处沿拉伸方向存在大量等轴韧窝。

参考文献 References

[1] Wang Feng(王 锋), Chi Changzhi(迟长志), Tai Limin(台立民) et al. Hot Working Technology(热加工工艺)[J], 2016, 45(11): 9

- [2] Jiang Qing(蒋清), Meng Xiangwei(孟祥炜), Xiao Wenfeng(肖文丰) *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2015, 44(15): 35
- [3] Jia Panjiang(贾泮江), Tang Hui(唐辉), Chen Bangfeng(陈邦峰) *et al.* *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2008(1): 30
- [4] Yan Qingsong(严青松), Yu Huan(余欢), Xu Zhifeng(徐志锋) *et al.* *Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2009, 30(2): 265
- [5] Wang Fude, Williams S, Colegrove P *et al.* *Metall Mater Trans A*[J], 2013, 44(2): 968
- [6] Gu Jianglong, Ding Jialuo, Cong Baoqiang *et al.* *Adv Mater Res*[J], 2014, 1081: 210
- [7] Gu Jianglong, Wang Xiaoshu, Jing Bai *et al.* *Mater Sci Eng A*[J], 2018, 712(01): 292
- [8] Brice C A, Dennis N. *Metall Mater Trans A*[J], 2015, 46(5): 2304
- [9] Huang Dan(黄丹), Zhu Zhihua(朱志华), Geng Haibin(耿海滨) *et al.* *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2017, 45(3): 66
- [10] Sun Hongye(孙红叶), Cong Baoqiang(丛保强), Qi Zewu(祁泽武) *et al.* *Rare Metal Materials & Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(8), 2203
- [11] Ryan E M, Sabin T J, Watts J F *et al.* *J Mater Process Technol*[J], 2018, 262: 577
- [12] Guo Yaxuan(郭亚轩), Hu Yang(胡洋), Bu Xianzheng(步贤政) *et al.* *Welding Technology*(焊接技术)[J], 2018(1): 25
- [13] Li Quan(李权), Wang Fude(王福德), Wang Guoqin(王国庆) *et al.* *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2018, 61(3): 74
- [14] Sun Rujian(孙汝剑), Zhu Ying(朱颖), Li Liuhe(李刘合) *et al.* *Laser & Optoelectronics Progress*(激光与光电子学进展)[J], 2018(1): 129
- [15] Cong Baoqiang(丛保强), Sun Hongye(孙红叶), Peng Peng(彭鹏) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(5): 1359
- [16] Kobayashi T. *Mater Sci Eng A*[J], 2000, A280: 8
- [17] Ogris E, Wahlen A, Luchinger H *et al.* *Journal of Light Metals*[J], 2002(2): 263
- [18] Sun Yezan(孙业赞), Li Songchun(历松春), Zhang Guoqiang(张国强) *et al.* *Acta Metall Sin*(金属学报)[J], 1999, 35(9): 939
- [19] Francis J A, Delphine Cantin G M. *Mater Sci Eng A*[J], 2005, A407: 322
- [20] Mae H, Teng X, Bai Y *et al.* *Mater Sci Eng A*[J], 2007, A459: 156
- [21] Avallé M, Belingardi G, Cavatorta M P *et al.* *Int J Fatigue*[J], 2002, 24: 1

Microstructure and Properties of ZL114A Aluminum Alloy Prepared by Wire Arc Additive Manufacturing

Li Chengde¹, Gu Huimin¹, Wang Wei², Zhai Yuchun^{1,3}, Ming Zhu², Wang Shuai¹, Ren Lingling¹, Wang Zhenbiao³

(1. Northeastern University, Shenyang 110004, China)

(2. NingBo Sub-Academy of the National Weapons Science Research Academy, Ningbo 315103, China)

(3. North East Industrial Materials & Metallurgy Co., Ltd, Fushun 113200, China)

Abstract: The effect of wire arc additive manufacturing process on the microstructure and properties of ZL114A aluminum alloy was studied by metallographic microscope, scanning electron microscope and electronic universal test. Compared with the traditional casting method, the microstructure of as-deposited WAAM ZL114A has smaller dendrite spacing, the distribution of fine Si-phase is uniform, and the chemical composition is controlled effectively. Through T6 heat treatment process, Si-phase is fully spheroidized and the second phase is dispersed on the matrix of alpha-Al. Meanwhile, the mechanical properties are significantly improved. The tensile strength, yield strength and elongation are 360 MPa, 315 MPa and 7.5%, respectively; in particular, the elongation is 2.1 times higher than that of sand cast sample. The tensile fracture is characterized by ductile fracture. The defects of WAAM ZL114A are mainly pores smaller than 30 μm . After heat treatment, the number of pores decreases and the size increases.

Key words: wire arc additive manufacturing (WAAM); aluminum alloy; microstructure and properties; defect