

Al-Mg-Si合金电弧熔丝增材构件组织与性能*

张睿泽^{1,2}, 从保强^{1,2}, 齐铂金^{1,2}, 祁泽武^{1,2}

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 航空高端装备智能制造工信部重点实验室, 北京 100191)

[摘要] 以复合超高频脉冲方波变极性钨极氩弧(HPVP-GTAW)为热源, Al-5Mg(ER5087)和 Al-5Si(ER4043)两种焊丝为填丝材料进行铝合金电弧熔丝增材制造, 通过控制两焊丝的送丝速度获得不同主要合金元素 Mg 和 Si 含量的 Al-Mg-Si 合金薄壁构件, 试验研究不同 Mg/Si 比及热处理对薄壁构件组织及性能的影响。结果表明: 合金组织主要由柱状晶及少量等轴晶组成, 呈非均匀分布。调节主要合金元素含量可实现对铝合金增材构件性能的控制, 随着 Mg/Si 比的增加, 增材构件的力学性能呈上升趋势, 各向同性; 经过固溶及人工时效热处理后, 增材构件的力学性能得到显著提升, 但塑性降低。

关键词: 铝合金; 电弧增材制造; 热处理; 显微组织; 力学性能

Microstructure and Tensile Properties of Double-Wire+Arc Additive Manufactured Al-Mg-Si Alloy

ZHANG Ruize^{1,2}, CONG Baoqiang^{1,2}, QI Bojin^{1,2}, QI Zewu^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. MIIT Key Laboratory of Aeronautics Intelligent Manufacturing, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] Double-wires+arc additive manufacturing (D-WAAM) system for Al-Mg-Si alloy using hybrid pulsed-variable polarity gas tungsten arc welding (HPVP-GTAW) process was established. When two different alloying wires (Al-5Mg + Al-5Si) were used, ternary (Al-Mg-Si) alloys with various compositions can be obtained by adjusting the wire feed speed of the two wires. Mechanical properties of the as-deposited and heat treatment Al-Mg-Si alloys were investigated. Microstructures of Al-Mg-Si deposits are mainly composed of columnar and equiaxed dendrite grains with non-uniform distribution characteristics. Mechanical properties of the as-deposited and heat treatment Al-Mg-Si alloys were investigated. Experimental results show that with the increase of the Mg/Si ratio, tensile properties of the as-deposited alloy increased, which were also nearly isotropic along the two directions. After heat treatment, tensile property of some specimens increased a lot but too much plasticity was loosed.

Keywords: Aluminum alloy; Double-wire+ arc additive manufacturing; Heat treatment; Microstructure; Mechanical property

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.05.080

电弧熔丝增材制造技术(Wire +Arc Additive Manufacturing, WAAM)具有成形尺寸大、沉积效率高、原料利用率高等优点, 将该工艺应用于铝合金构件的制造可节约材料、提高效率, 具有良好的前景, 目前国内外研究人员就铝合金 WAAM 的研究已取得一定进展。祁泽武等^[1]采用 VP-GTAW 制造 Al-Cu-Mg 薄壁试样, 结果表明, 不同 Cu、Mg 元素含量试样的组织及性能存在差异。黄丹等^[2]以 5A06 铝合金焊丝为成形材料进行

TIG 电弧增材制造试验, 结果表明成形件抗拉强度可达 295MPa, 可达退火态 5A06 铝合金的 85%, 各向同性。Radovan 等^[3-4]使用 VP-GTAW 电弧对 4043 及 5356 铝合金的成形及组织进行研究, 试验表明不同工艺参数对成形及力学性能有很大影响。Al-Mg-Si 系合金材料具有高强韧性、适宜的成形性及较为理想的耐蚀性, 主要应用于航天、交通、通信等领域^[5-6], 但目前尚无与该系合金对应的商业化铝合金焊丝可供使用。本文以 ER4043 (Al-5Si)及 ER5087 (Al-5Mg)作为填充金属,

*基金项目: 北京市科技计划装备制造专项资助项目(Z161100001516005)。

VP-GTAW 电弧为热源制备 Al-Mg-Si 薄壁构件,通过控制两焊丝送丝速度,探究不同 Mg、Si 元素含量及固溶+人工时效热处理对构件力学性能和组织的影响,研究结果可为 Al-Mg-Si 系铝合金专用丝材的研发及进一步开展铝合金 HPVP-GTAW 电弧熔丝增材制造提供参考依据。

1 试验方法

基板选用尺寸为 330mm×150mm×12mm 的 6061-T6 铝合金平板,丝材选用直径为 1.2mm 的 ER4043 和 ER5087 铝合金焊丝,铝合金基板及两焊丝合金元素含量如表 1 所示。试验前使用碱性溶液清洗铝合金基板去除表面油污,随后采用机械打磨方法去除表面氧化膜,最后用丙酮擦拭干净。图 1 为搭建的 HPVP-GTAW (HybridPulsed VP-GTAW) 电弧熔丝双丝增材 (Double-Wires+ Arc Additive Manufacturing, D-WAAM) 试验系统,主要由复合超高频脉冲方波 VP-GTAW 电源、TIG 焊枪 (WP-27)、双丝送丝系统、保护气系统、运动平台及工装等部分组成。本文试验采用单道多层堆积成型的方式制备铝合金薄壁构件。

试验电流参数为变极性频率 100Hz,正极性脉冲电流 100A,负极性脉冲电流 120A,正极性持续时间比 80%,其他工艺过程参数为:直径 3.2mm W-0.2%Ce 电极,电弧长度保持约 5mm;保护气体 Ar (99.99%) 流量为 15L/min;制备试样长 280mm,高

105mm。图 2 所示为 D-WAAM 工艺制备的 Al-Mg-Si 合金薄壁构件,构件成形稳定,层间连接良好,侧面光滑无杂质。

Al-Mg-Si 合金中强化相为 Mg₂Si,其 Mg、Si 元素质量比为 1.73,在该比值下可得到最大数量的强化相。试验制备 3 组增材构件, Mg、Si 比分别为 1.3、1.7、2.1 (下文以 A、B、C 分别代表 3 组构件),所用工艺参数详见表 2。薄壁构件中 Mg、Si 元素的理论质量分数可由下式计算求得:

$$E = \text{WFS}_1 D_1^2 \rho_1 E_i / (\text{WFS}_1 D_1^2 \rho_1 + \text{WFS}_2 D_2^2 \rho_2) \quad (1)$$

其中, E 为所求元素在薄壁构件中的质量分数; WFS_i 为焊丝的送丝速度 (Wire Feed Speed), m/min; ρ_i 为焊丝的密度, g/cm³; D_i 为焊丝的直径, mm; E_i 为所求元素在焊丝中的质量分数, %。

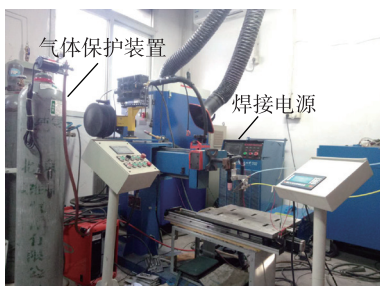
Al-Mg-Si 合金凝固过程中,首先发生 Al-Mg₂Si 伪二元共晶反应^[7-9],共晶温度区间为 583.5~594℃;当 Mg、Si 元素质量比小于 1.73 时,温度缓慢降至 555℃ 时会继续发生 Al-Mg₂Si-Si 三元共晶反应。采用固溶+人工时效对构件进行热处理,参考 6XXX 系典型铝合金 6061 及 6063 的热处理规范及 Al-Mg-Si 合金凝固路径^[10-12],设计用于电弧增材构件的热处理参数。A 组构件固溶温度为 535℃, B、C 两组构件固溶温度为 565℃,固溶时间均为 2h,人工时效温度均为 170℃,时效时间均为 6h,详见表 3。

如图 3 (a) 所示,利用线切割机取样,每组参数下的薄壁构件分别在水平和垂直方向的不同位置各取 3

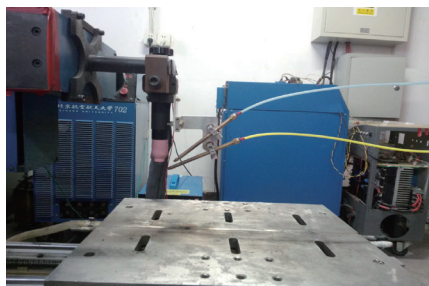
表1 ER5087和ER4043焊丝及6061-T6铝板主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical compositions of ER5087, ER4043 and 6061-T6

材料	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	Si	Fe	Cu	Mn	Zr	Mg	Cr	Zn	Ti
ER4043	2.69	5	≤ 0.8	≤ 0.3	≤ 0.05	—	≤ 0.05	—	≤ 0.10	≤ 0.20
ER5087	2.66	0.05	0.1	—	0.737	0.12	5.05	0.11	0.0015	0.114
6061	2.7	0.4	0.7	0.4	0.15	—	1.0	0.2	0.1	0.13



(a) 总体构成



(b) 双丝机构



(c) 送丝机

图1 HPVP-GTAW电弧增材系统
Fig.1 HPVP-GTAW D-WAAM system

个拉伸试样,构件中间部位用于微观组织观测及硬度测试;在 SANS (50kN) 电子拉伸试验机上进行室温

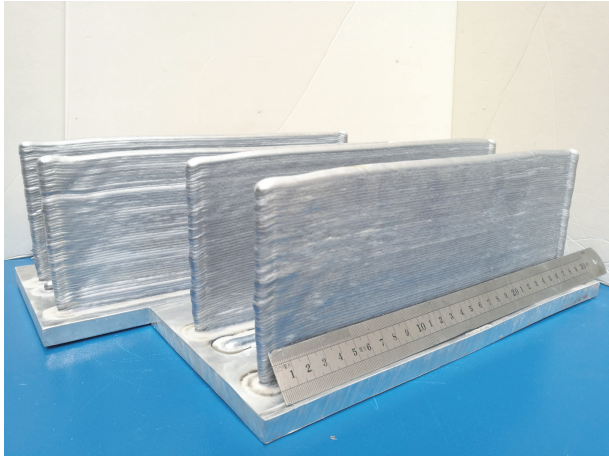


图2 Al-Mg-Si薄壁试样
Fig.2 Thin wall specimen of Al-Mg-Si alloy

表2 双丝电弧增材成形工艺参数

Table 2 Process parameters for double-wire+arc additive manufacturing

构件	Mg/Si	I/A	WFS/ (m·min ⁻¹)		运动速度 / (m·min ⁻¹)	E/%	
			4043	5087		Mg	Si
A	1.3	120	1.35	1.8	300	2.85	2.18
B	1.7	120	1.35	2.4	300	3.22	1.84
C	2.1	120	1.05	2.4	300	3.44	1.63

表3 电弧增材构件热处理参数

Table 3 Heat treatment process parameters for WAAM components

构件	Mg/Si	固溶温度 / °C	固溶时间 / h	时效温度 / °C	时效时间 / h
A	1.3	535	2	170	6
B	1.7	565	2	170	6
C	2.1	565	2	170	6

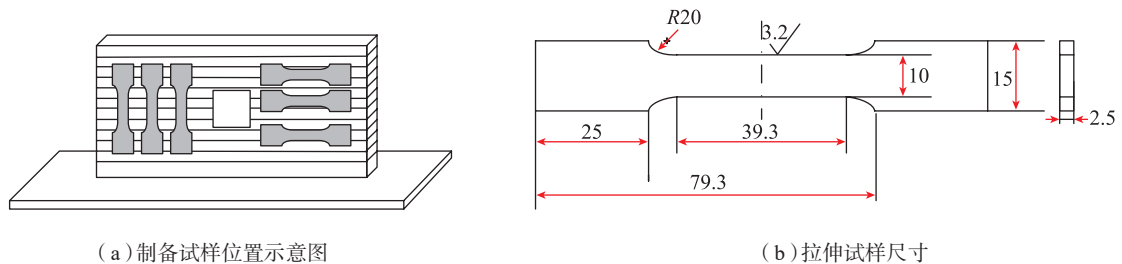
拉伸性能测试,试样具体尺寸参数见图3(b),载速率为2mm/min。在成形件横截面中间部位,沿堆积方向使用FM-800显微硬度计测定显微硬度(HV),加载力1.96N,保持时间10s,采集30个点的硬度值,点间距为0.5mm。依据国家标准制备金相试样,使用Keller试剂(HNO₃ 2.5mL; HF 1mL; HCL 1.5mL; H₂O 92mL)侵蚀试样,并在OLYMPUS BX51M光学显微镜下观察显微组织。使用CamScan-3400扫描电子显微镜观察拉伸试样断口形貌,观测微观区域元素分布,使用D/MAX 2200PC X射线衍射分析仪进行物相分析,确定成形构件的主要物相组成。

2 结果分析与讨论

2.1 显微组织

图4所示为A、B、C3组薄壁构件原始沉积态典型金相组织,铝合金构件内部组织呈现层状分布特征,分为层中区域及层间重熔区域,在制造过程中两者经历的热过程不同,组织呈现不同特点,试样组织主要由柱状树枝晶及少量等轴树枝晶组成。由图5对比人工时效前后的金相组织可知,热处理后晶界处析出了更多弥散分布的Mg₂Si相及Si颗粒,组织中未出现明显的气孔缺陷。

利用SEM及XRD对原始沉积态试样进行测试(见图6、图7),结果表明A、B、C3组试样的SEM图像及第2相分布基本一致,仅在第2相的数量上存在细微差异,X射线衍射图谱基本相同,故仅就B试样的测试结果进行分析。观察背散射电子图像及EDS面扫图像,可知含Si的白色第2相主要分布在晶界,少量颗粒存在于基体内,点扫描标定可知(表4),第2相Mg/Si比低于1.73,推断认为第2相由Mg₂Si和Si组成;就主要合金元素分布而言,基体中Al元素含量较多呈现高亮状态,相反Mg、Si则在晶界处偏聚。试样X射线衍射图谱中3个较强的峰与α-Al相符合,几个较弱的峰则与强化相Mg₂Si相一致,α-Al在合金中作为基体元素含量高,故而衍射峰强度较大,而强化相含量仅为



(a) 制备试样位置示意图

(b) 拉伸试样尺寸

图3 制备试样位置示意图及拉伸试样尺寸

Fig.3 Schematic diagram of sample and parameters of tensile specimen

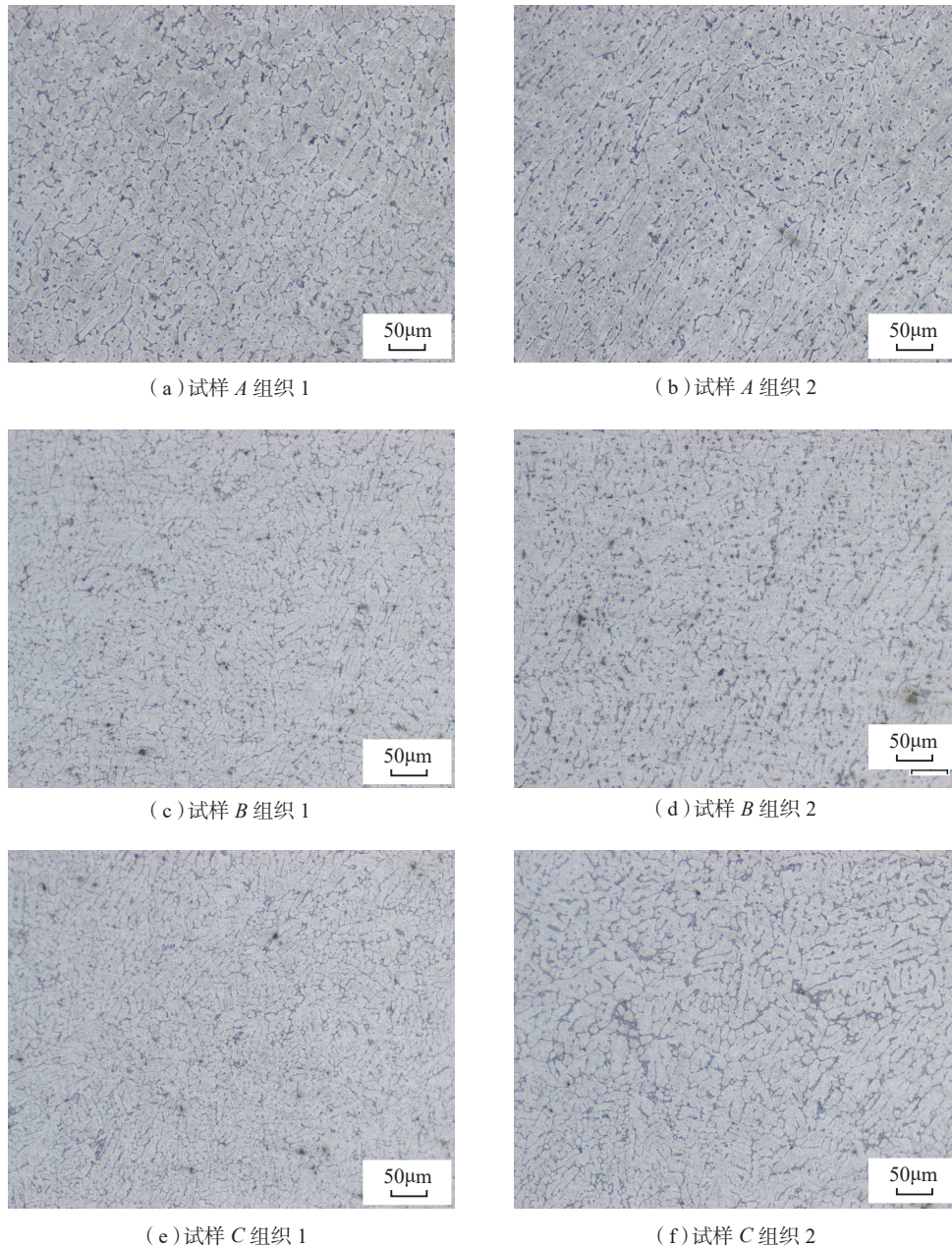


图4 原始沉积态A、B、C试样典型组织
Fig.4 Typical microstructure of as-deposited thin wall specimens

4%左右,衍射峰强度较弱。

2.2 力学性能

对3种不同Mg/Si比例Al-Mg-Si薄壁构件进行拉伸性能测试,测试原始状态下及热处理后构件的拉伸性能,结果如表5所示。随Mg/Si比值的增加,原始状态下双丝构件的抗拉强度变化幅度不大,屈服强度呈逐渐上升趋势,塑性未出现明显下降,水平方向与垂直方向拉伸强度基本相同,考虑试验误差因素,可认为双丝电弧增材制备的铝合金薄壁构件各向同性。分析认为,Mg/Si比影响组织中强化相的数量和分布,随Mg元素

含量的增加,过剩Si的比例逐渐减小,强化相逐渐增多,导致拉伸强度的增加,过剩Mg的出现也将对强度有一定提升作用,但会降低塑性。

经热处理强化后,薄壁构件的强度得到了显著提升,两个方向强度较为均匀,抗拉强度最高值达到340MPa(A组拉伸试样),较直接沉积态合金提高80%以上,但延伸率显著下降,由沉积态的13%下降至3.5%;B、C两组拉伸试样延伸率略有下降,由11%下降至8%。C组试样拉伸强度低于B组试样,分析认为过剩Mg元素虽可提升一定强度,但会限制主要强

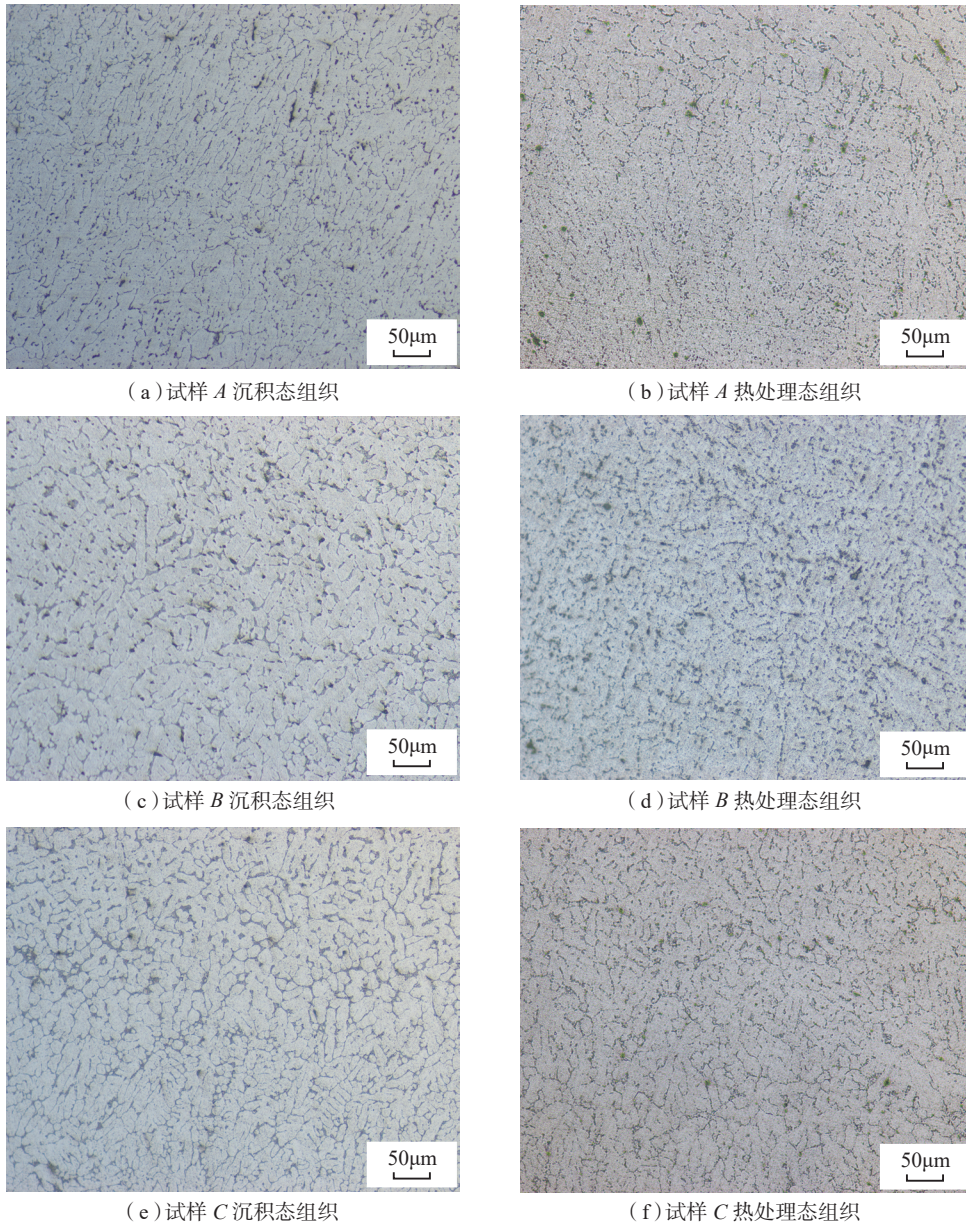


图5 热处理前后试样显微组织

Fig.5 Microstructure of as-deposited thin wall specimens before and after heat treatment

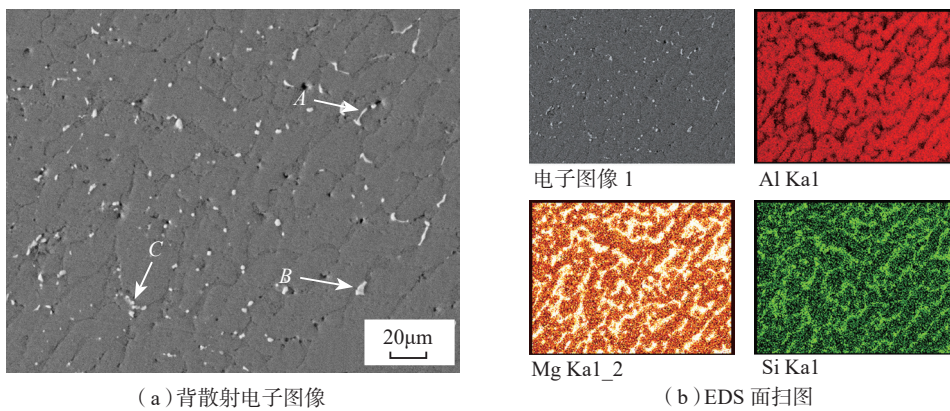


图6 原始试样B背散射电子图像及EDS面扫图

Fig.6 SEM graph of as-deposited specimen B and EDS mapping graph

化相 Mg_2Si 在 Al 基体中的溶解度进而影响固溶强化效果^[13]。

3 组构件原始沉积态的硬度平均值如图 8 (a) 所示, 变化趋势与拉伸性能相一致, Mg/Si 比值对合金的硬度

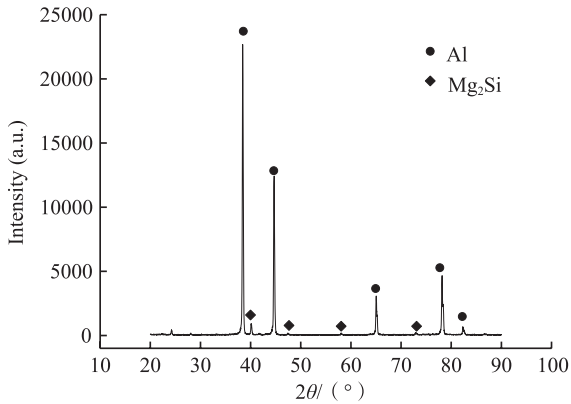


图7 原始状态试样B XRD衍射图谱
Fig.7 XRD patterns of as-deposited specimen B

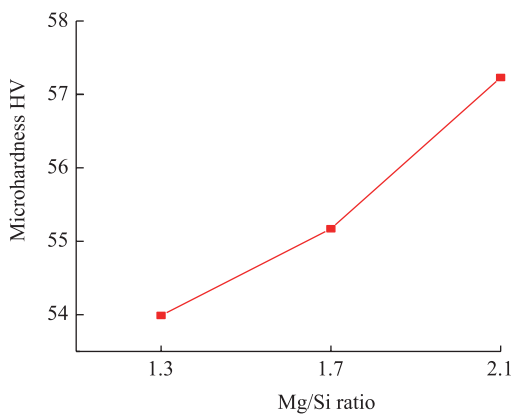
有一定影响, 随比值的增加, 合金的平均硬度缓慢增加。图 8 (b) 为热处理后 3 组构件的硬度数值分布, A、B 两组构件的硬度值大幅提高, 前者提升幅度最大达到了 137%, C 组构件提升较少。分析认为加工中 Mg 元素的烧损导致 Mg/Si 比低于理论计算值, B 组构件可能出现过剩 Si, 由于固溶温度高于三元共晶点温度, 因此在晶间会出现不利于组织性能的低熔点共晶相, 降低强化效果。

表4 第2相质点元素测定
Table 4 EDS results of the second phases

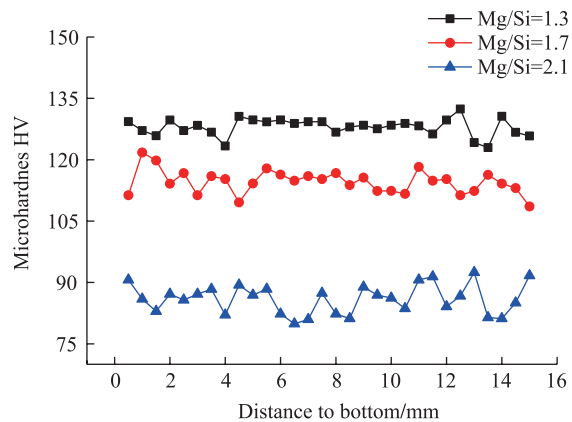
元素	A 组	B 组	C 组
Al	84.97	95.55	89.37
Mg	1.48	1.21	1.05
Si	13.55	3.24	9.57

表5 不同Mg/Si含量的电弧增材Al-Mg-Si合金拉伸试验结果
Table 5 Tensile properties of WAAM Al-Mg-Si component with different Mg/Si ratios

序号	Mg/Si ratio	屈服强度/MPa		抗拉强度/MPa		延伸率/%	
		水平方向	垂直方向	水平方向	垂直方向	水平方向	垂直方向
1	1.3	77.5	78.43	176.8	178.3	13.6	12
2	1.7	76.6	84	176.8	187.5	13.3	12.8
3	2.1	83.16	89.8	190.8	200.3	11.5	11.4
4	1.3HT	294.19	297.13	332.36	339.20	3.3	3.5
5	1.7HT	251.81	267.94	321.43	322.60	8.1	7.4
6	2.1HT	222.15	223.57	285.53	291.30	8.1	9.7



(a) 原始状态硬度平均值



(b) 3 组试样热处理状态硬度值分布

图8 3组试样原始沉积态及热处理态硬度值

Fig.8 Microhardness of as-deposited and heat treatment specimens

选取热处理后塑性下降最多的 A 组拉伸试样断口形貌进行分析,由图 9 可知热处理后试样为脆性断裂,存在明显的层状断面及破坏晶界连续性的脆性相。原始状态下试样的断口处存在一定数量的韧窝,但仍可观察到层状断面的存在,故仍属脆性断裂。图 10 为拉伸试样断口金相图片,可知,拉伸试样断裂时裂纹撕裂晶粒扩展,破坏晶粒完整性,热处理前后拉伸试样的断裂方式均为穿晶断裂。

3 结论

(1) 采用双丝电弧熔丝增材制造的 Al-Mg-Si 薄壁

构件组织呈逐层分布特征,组织主要由柱状树枝晶及少量等轴晶组成,Al 元素主要存在于基体,而 Mg、Si 元素偏聚于晶界处。

(2) 原始状态下薄壁构件的力学性能随 Mg/Si 增加略微提高,比值为 2.1 的构件抗拉强度最优可达 200MPa,3 组构件延伸率均可达到 12% 左右。

(3) 热处理可有效提高薄壁构件的力学性能,比例为 1.3 的构件力学性能提升最大,抗拉强度较原始沉积态提升 80% 以上,达到 340MPa,延伸率下降至 3.5%,比例为 1.7 的构件综合性能最优,强度可达到 320MPa,与 6061-T6 轧制板材相当,断后延伸率为 8%。

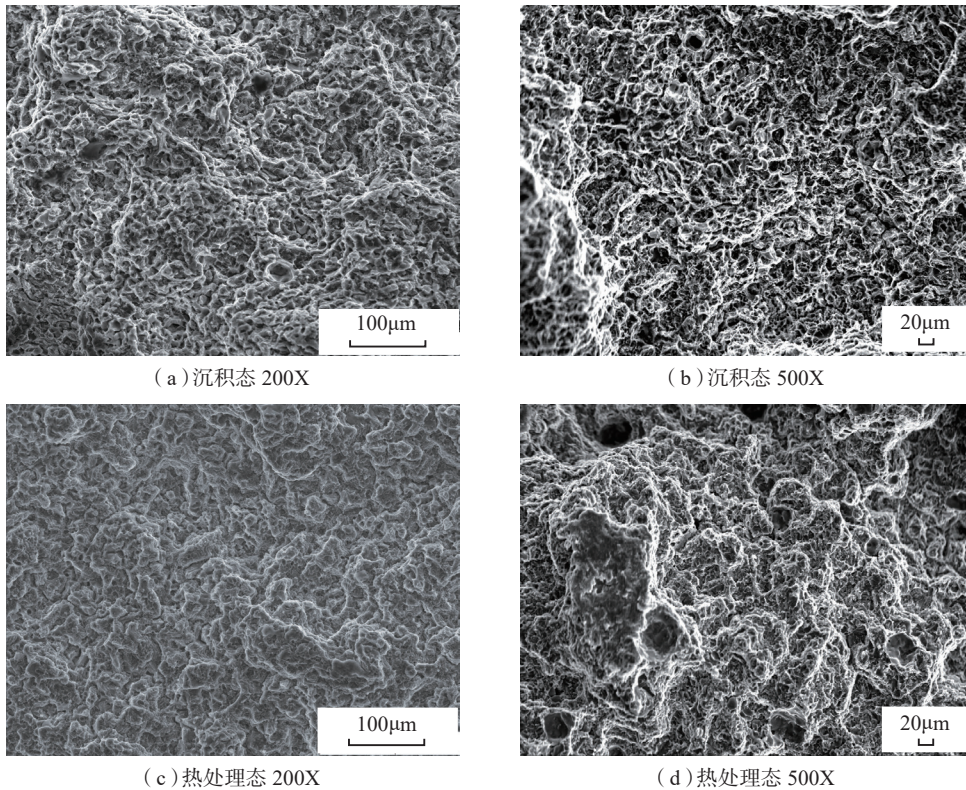


图9 A组拉伸试样断口的SEM图像
Fig.9 Fracture morphology of as-deposited and heat treatment specimen A

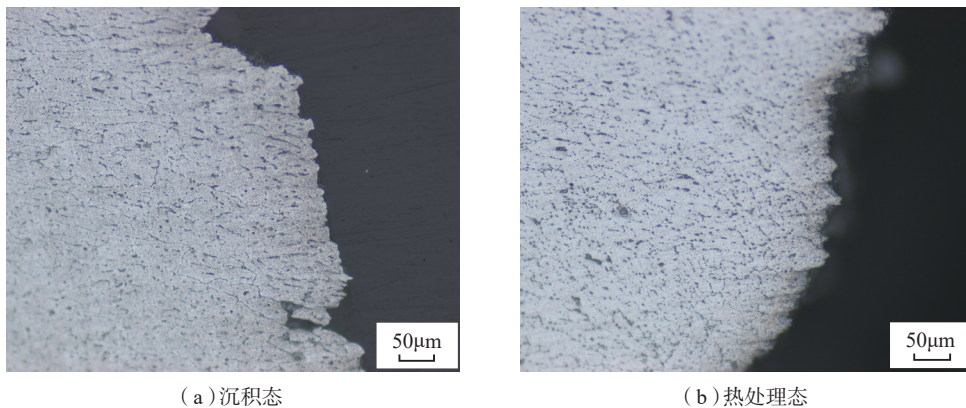


图10 A组试样断口附近金相组织
Fig.10 Microstructure around fracture of specimen A

参 考 文 献

- [1] QI Z W, CONG B Q. Microstructure and mechanical properties of double-wire + arc additively manufactured Al-Cu-Mg alloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 255: 347-353.
- [2] 黄丹, 朱志华, 耿海滨, 等. 5A06 铝合金 TIG 丝材-电弧增材制造工艺[J]. *材料工程*, 2017, 45(3): 66-72.
- HUANG Dan, ZHU Zhihua, GENG Haibin, et al. TIG wire and arc additive manufacturing of 5A06 aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2017, 45(3): 66-72.
- [3] WANG H, JIANG W, OUYANG J H, et al. Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 148(1): 93-102.
- [4] OUYANG J H, WANG H, KOVACEVIC R. Rapid prototyping of 5356-aluminum alloy based on variable polarity gas tungsten arc welding: Process control and microstructure[J]. *Materials & Manufacturing Processes*, 2002, 17(1): 103-124.
- [5] 张新明, 刘胜胆. 航空铝合金及其材料加工[J]. *中国材料进展*, 2013, 32(1): 39-55.
- ZHANG Xinming, LIU Shengdan. Aeronautical aluminum alloy and processing[J]. *Materials China*, 2013, 32(1): 39-55.
- [6] 杨守杰, 戴圣龙. 航空铝合金的发展回顾与展望[J]. *材料导报*, 2005, 19(2): 76-80.
- YANG Shoujie, DAI Shenglong. Review and prospect of the development of aeronautical aluminum alloy[J]. *Materials Review*, 2005, 19(2): 76-80.
- [7] ZHONG H, ROMETSCH P, ESTRIN Y. Effect of alloy composition and heat treatment on mechanical performance of 6xxx aluminum alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(7): 2174-2178.
- [8] ZHANG J, FAN Z, WANG Y Q, et al. Equilibrium pseudobinary Al-Mg₂Si phase diagram[J]. *Materials Science & Technology*, 2001, 17(5): 494-496.
- [9] GARRETT R P, LIN J, DEAN T A. An investigation of the effects of solution heat treatment on mechanical properties for AA 6xxx alloys: experimentation and modelling[J]. *International Journal of Plasticity*, 2005, 21(8): 1640-1657.
- [10] 张国鹏. 热处理工艺对新型 6XXX 系铝合金组织与性能的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- ZHANG Guopeng. Influence of heat treatment on microstructure and property of new type 6XXX series aluminum alloy[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [11] 刘文静, 钟利萍. 6XXX 铝合金热处理工艺的研究概况[J]. *材料导报: 纳米与新材料辑*, 2012(1): 137-140.
- LIU Wenjing, ZHONG Liping. Status of heat treatment process for 6XXX series aluminum alloys[J]. *Materials Review: Nanomaterials and New Materials*, 2012(1): 137-140.
- [12] 张宏辉, 李旭, 项胜前, 等. 6XXX 系变形铝合金的合金化原理和生产应用[J]. *轻合金加工技术*, 2012, 40(3): 12-17.
- ZHANG Honghui, LI Xu, XIANG Shengqian, et al. Alloying principle and its application in production of 6XXX series wrought aluminum alloy[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2012, 40(3): 12-17.
- [13] 李念奎. 铝合金材料及其热处理技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- LI Niankui. Aluminum alloys and heat treatment[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
- 通讯作者: 从保强, 博士, 副教授, 研究方向为高效焊接与电弧增材制造, E-mail: cong bq@buaa.edu.cn.
- (责编 铃兰)
-
- (上接第 79 页)
- [15] CHEN L Y, KONISHI H, FEHRENBACHER A, et al. Novel nanoprocessing route for bulk graphene nanoplatelets reinforced metal matrix nanocomposites[J]. *Scripta Materialia*, 2012, 67(1): 29-32.
- [16] 李勋, 柏帆, 付余, 等. 高体积比铝基 SiC 复合材料的铣磨试验研究[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(1/2): 24-28.
- LI Xun, BAI Fan, FU Yu, et al. Experimental study on mill-grinding of high volume fraction SiC_p/Al metal matrix composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(1/2): 24-28.
- [17] 聂俊辉, 樊建中, 魏少华, 等. 航空用粉末冶金颗粒增强铝基复合材料研制及应用[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(16): 26-36.
- NIE Junhui, FAN Jianzhong, WEI Shaohua, et al. Research and application of powder metallurgy particle reinforced aluminum matrix composite used in aviation[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(16): 26-36.
- [18] 张冰玉, 王岭, 焦健, 等. 界面层对 SiC_p/SiC 复合材料力学性能及氧化行为的影响[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(12): 78-83.
- ZHANG Bingyu, WANG Ling, JIAO Jian, et al. Effect of interface on mechanical property and oxidation behavior of SiC_p/SiC composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(12): 78-83.
- [19] 张文毓. 铝基复合材料国内外技术水平及应用状况[J]. *航空制造技术*, 2015, 58(3): 82-85.
- ZHANG Wenyu. Domestic and foreign technical level and application condition of aluminum matrix composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 58(3): 82-85.
- [20] 张冀, 陈金梅, 冉申, 等. 碳化硅增强金属基复合材料的新型制备工艺[J]. *航空制造技术*, 2014, 57(6): 109-112.
- ZHANG Ji, CHEN Jinmei, RAN Shen, et al. New preparation technology of silicon carbide particles reinforced metal matrix composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 57(6): 109-112.
- 通讯作者: 田文明, 博士, 副教授, 研究方向为金属材料、粉末冶金、金属基复合材料, E-mail: tianwenming.dhr@163.com.
- (责编 铃兰)