

铝合金双丝 VP-GTAW 增材构件组织和性能

孙红叶^{1,2}, 从保强^{1,2}, 祁泽武^{1,2}, 齐铂金^{1,2}, 赵 罡^{1,2}, 丁佳洛³

(1. 北京航空航天大学, 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)

(3. Cranfield University, UK MK430AL)

摘要:以 Al-6.3Cu 和 Al-5Mg 为填丝材料进行铝合金双丝 VP-GTAW 增材制造试验。结果表明,采用双丝 VP-GTAW 制备试样可提高成形效率,且成形稳定;通过调节 2 种丝材的送丝速度可以获得不同主要合金元素含量的 Al-Cu-Mg 合金,合金组织主要由柱状晶和等轴枝晶组成,且呈非均匀分布特征,调节主要合金元素含量可实现对铝合金试样性能的控制。原始状态下铝合金试样的显微硬度(HV)为 900~1000 MPa,抗拉、屈服强度分别可达 286 和 183 MPa,但塑性较差,仅为 4.5%。

关键词:双丝电弧增材; Al-Cu-Mg 合金; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG47

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)08-2203-05

高强铝合金以其高的比强度和良好的断裂韧性、抗疲劳、耐腐蚀等^[1]性能被广泛应用于航空航天等领域。电弧填丝增材制造(wire+arc additive manufacturing, WAAM)技术具有成形尺寸大、设备简单、制造成本低等特点^[2,3],将 WAAM 用于铝合金构件的制造可节省材料、降低成本,国内外研究人员针对铝合金 WAAM 技术的研究已取得一定进展。从保强^[4-6], Gu^[7]等研究了铝合金 WAAM 气孔问题并提出了控制气孔缺陷的方法; Ouyang, Wang 等^[8,9]采用 VP-GTAW 电弧对 Al-5Mg、Al-5Si 成形及组织性能进行了研究。为进一步提升铝合金 WAAM 构件性能,Gu^[10]等采用层间轧制和热处理辅助工艺措施对 2319 铝合金 WAAM 试件进行了增强处理,构件性能显著提高。本研究提出将双丝 WAAM 工艺应用于铝合金构件的制备。一方面,与常规单丝相比,双丝可有效提高沉积效率^[11];另一方面,通过控制 2 种丝材的送丝速度,可调节合金元素含量,达到控制构件力学性能的目的。为保证良好的熔池可见性及成形质量,本研究采用 VP-GTAW 电弧作为热源,进行铝合金双丝电弧增材试验,对其适用性及构件组织力学性能开展研究,研究结果可为 WAAM 铝合金的制备和应用提供参考依据。

1 实 验

双丝电弧增材制造(double-wires plus arc additive manufacturing, D-WAAM)系统主要由 VP-GTAW 电源、送丝机(2 台)、供气系统、焊枪及双丝送丝机构等组成。2 种丝材通过专门设计的送丝装置送入熔池,其送丝角度可单独调节,从而使双丝在熔池前缘形成连续熔滴过渡,以保证成形过程的稳定和连续。

通过调节 2 种不同丝材的送丝速度,可获得不同合金元素含量的构件,2 种丝材混合后,合金中主要元素的质量分数 ω 由下式求得:

$$\omega = v_{WFSi} D_i^2 \rho_i \omega_i / (v_{WFS1} D_1^2 \rho_1 + v_{WFS2} D_2^2 \rho_2) \quad (1)$$

式中: ω_i —所求元素在丝材中的质量分数(%); v_{WFSi} —送丝速度(wire feed speed); D_i —丝材直径; ρ_i —丝材密度(g/cm^3); $i=1, 2$ 。

基板选择尺寸规格为 320 mm×150 mm×12 mm 的 2A12 铝合金平板,试验前铝合金基板先用丙酮擦拭去污,然后采用机械打磨方法去除表面氧化膜。采用直径为 1.2 mm 的 ER2319 (Al-6.3Cu) 和 ER5087 (Al-5Mg) 2 种焊丝为成形材料。丝材和基板的主要化学成分和密度如表 1 所列,主要试验参数如表 2 所列,其中 v_{TS} 是运动速度(travel speed)。其它工艺参数分别是:焊枪瓷嘴至基板高度 15 mm,保护气体 Ar (99.99%),流量 15 L/min,制备试样长度 280 mm。图 1 所示为制备的试样,可以看出双丝电弧增材制备的铝合金试样表面良

收稿日期: 2016-08-11

基金项目: 北京市科技计划装备制造专项(Z161100001516005); 中央高校基本科研业务费专项资金(YWF-15-GJSYS-096, YWF-16-GJSYS-019)

作者简介: 孙红叶,女,1992年生,硕士,北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京 100191,电话: 010-82338722, E-mail: sunhongye@buaa.edu.cn

好，成形稳定；同时，其送丝速度达 2.7 m/min 以上，与单丝电弧增材^[12]相比，成形效率可提高 25% 以上。

按照图 2a 所示，利用线切割机分别制取组织观测和拉伸试样，组织试样经粗磨、抛光（SiO₂ 悬浮液）后，用 Kroll’s 试剂（HNO₃ 6 mL；HF 2 mL；H₂O 92 mL）浸蚀，使用 LEICA DM4000 光学显微镜和 CamScan-3400 扫描电子显微镜观察组织并进行 EDS 能谱分析，在试样中心部位进行 XRD 物相分析。

每组参数条件下取 3 个拉伸试样，室温下进行拉伸性能测试，加载速率为 2.0 mm/min，利用 CamScan-3400 扫描电子显微镜观察断口形貌。

按照图 2b 在组织观测试样上进行硬度测试，硬度仪型号为 FM800，加载力 1.96 N，保持时间 10 s，间距 0.5 mm。为表征成形构件组织的均匀性，进行硬度梯度(hardness gradient, HG)测量，按照 $HG=|H_{i+1} - H_i|/\Delta d$ 公式计算，其中， H_{i+1} 和 H_i 分别为第 $i+1$ 和第 i 个测试点的硬度值， Δd 为两点间距。

表 1 合金丝材和基板化学成分和密度

Table 1 Nominal composition and density of wires and substrate

Alloy	$\rho/$ g cm ⁻³	Element content, $\omega/\%$							
		Si	Fe	Cu	Mn	Zr	Mg	Ti	Al
ER2319	2.77	0.04	0.1	6.3	0.28	0.19	-	0.145	Bal.
ER5087	2.66	0.05	0.1	-	0.74	0.12	5.05	0.114	Bal.
2A12	2.75	0.5	0.5	4.3	0.6	-	1.5	0.20	Bal.

表 2 双丝电弧增材成形参数

Table 2 Parameters of D-WAAM process

Sample	I/A	$v_{WFS}/m\ min^{-1}$		$v_{TS}/$ mm min ⁻¹	Layer number	$\omega/\%$	
		ER 2319	ER 5087			Cu	Mg
1	120	1.5	1.2	300	50	3.57	2.19
2	120	1.8	1.0	300	70	4.11	1.76



图 1 D-WAAM Al-Cu-Mg 合金试件

Fig.1 As-deposited D-WAAM wall samples

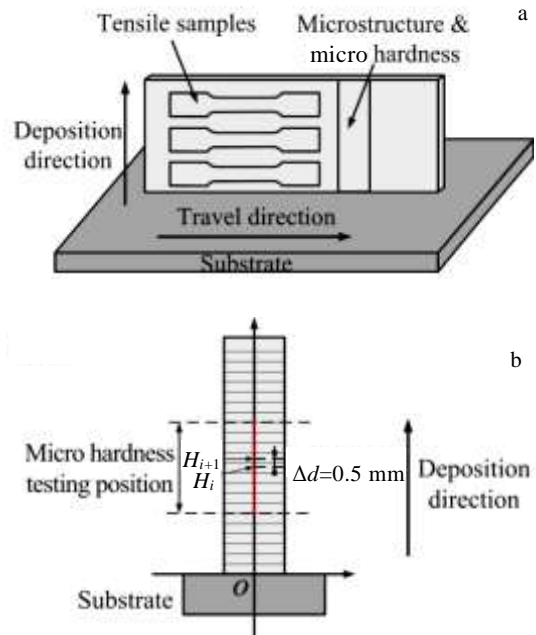


图 2 取样与显微硬度测试示意图

Fig.2 Schematic diagrams of sampling positions (a) and micro hardness test (b)

2 结果与分析

2.1 D-WAAM 显微组织特征

图 3 为 2 种不同送丝速度下增材成形构件的组织，可以看出，试样 1 主要由柱状晶(columnar zone, CLZ)和等轴枝晶(equiaxed dendrite zone, EQZ)交替组成，且呈现非均匀条状分布特征。试样 2 主要由柱状晶组成，仅含有少量等轴枝晶。

根据 Al-Cu-Mg 合金系的凝固模型路径^[13] (图 4) 和试样中 Cu、Mg 元素含量理论计算值可知，试样 1 (Cu-3.57; Mg-2.19) 中合金成分处在相图 $\alpha(Al)+S$ (Al_2CuMg) 两相区内，在凝固过程中发生伪二元共晶反应生成 $\alpha+S$ 两相共晶体；试样 2 (Cu-4.11; Mg-1.76) 的合金成分处于 $\alpha+\theta(Al_2Cu)+S$ 临界线，在凝固过程中发生三元共晶反应生成 $\alpha+\theta+S$ 三相共晶体。根据两试样的 XRD 物相分析 (图 5) 和 EDS 能谱分析 (图 6) 结果，可以看出，试样 1 中的白色颗粒 (A1 点) 为 S 相，晶界部位 (B1 点) 和晶界内部 (C1 点) 主要是 $\alpha(Al)$ 固溶体。试样 2 中的白色颗粒 (A2 点) 为 θ 相，沿晶界部位 (B2 点) 分布着的 $\alpha+\theta$ 共晶相。试样 1 的结果与凝固模型基本一致，合金中主要是 $\alpha+S$ 两相共晶体。由于 Mg 元素在电弧燃烧过程中易蒸发，使 Mg 元素含量低于理论计算值，试样 2 中的 S 相非常少，主要是 $\alpha+\theta$ 两相共晶体。

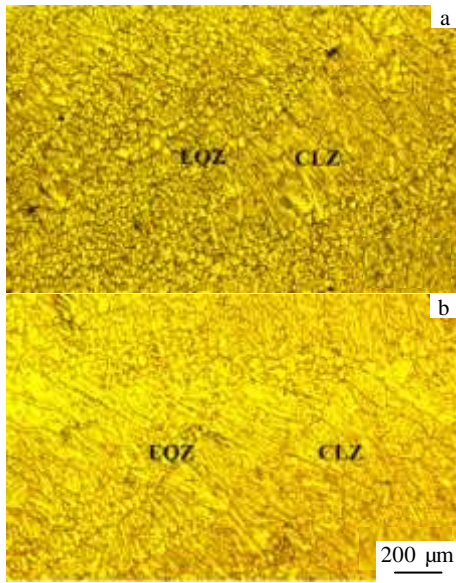


图3 双丝电弧增材试样显微组织

Fig.3 Microstructures of wall samples: (a) sample 1 and (b) sample 2

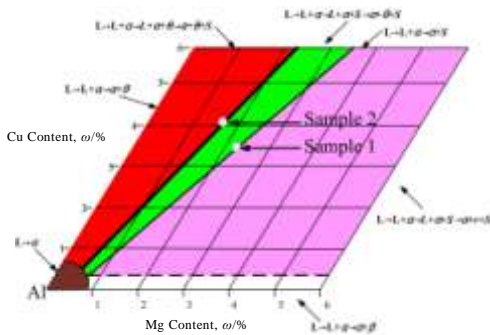


图4 Al-Cu-Mg 合金系的凝固路径模型

Fig.4 Solidification pathways for Al-Cu-Mg alloys^[13]

2.2 力学性能

双丝试样的显微硬度及其硬度梯度分布曲线如图7所示,可以看出,双丝试样的硬度值(HV)基本在900~1000 MPa之间,但试样1的硬度梯度变化较大。硬度梯度变化与其组织类型和分布状态有关,试样1组织由柱状晶和等轴枝晶组成,且2种组织呈现显著的非均匀分布特征,而试样2组织主要由柱状晶组成,其组织分布相对均匀,因而硬度梯度变化较小。

双丝试样的拉伸性能测试结果如表3所列,试样2(Cu-4.11; Mg-1.76)的力学性能较低,抗拉、屈服强度分别是267和171 MPa,延伸率3.5%。当Cu含量降低而Mg含量增加时,试样1(Cu-3.57;

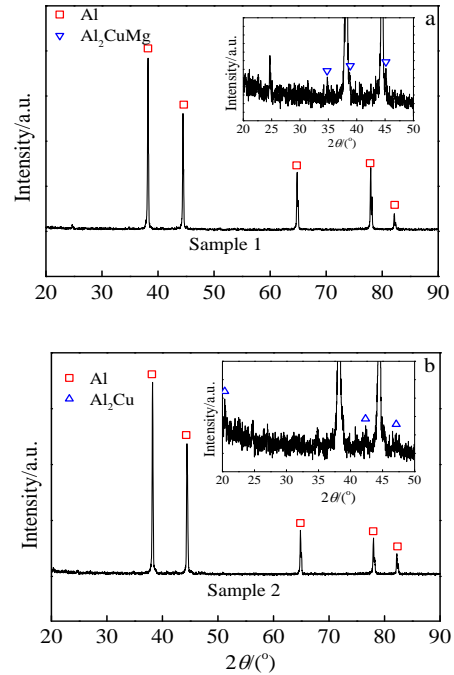
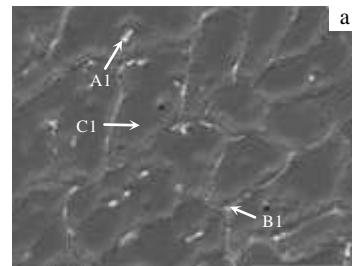
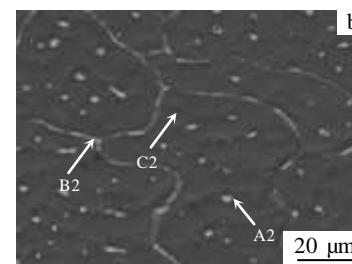


图5 2种试样 XRD 衍射物相分析

Fig.5 XRD patterns of sample 1 (a) and sample 2 (b)



Element	A1, ω/%	B1, ω/%	C1, ω/%
Al	61.51	90.88	96.52
Cu	35.93	7.72	2.07
Mg	2.56	1.39	1.41



Element	A2, ω/%	B2, ω/%	C2, ω/%
Al	68.91	73.49	96.44
Cu	29.24	25.58	2.65
Mg	1.84	0.92	0.91

图6 Al-Cu-Mg 合金 EDS 分析结果

Fig.6 EDS analysis results of sample 1 (a) and sample 2 (b)

Mg-2.19) 的力学性能有一定提高, 抗拉和屈服强度分别为 286 和 183 MPa, 都增加了 7%。分析认为, Cu 和 Mg 元素含量的变化, 使合金中的主要强化相改变, 试样 1 中 S 相的强化效果高于 θ 相^[14] (试样 2), 因而其抗拉和屈服强度较高。但同时由于 θ 相和 S 相延展性较差, 使得 2 种试样的延伸率较低。

根据作者对 2319 单丝 WAAM 试样力学性能的测试结果^[12]可知, 相比较 2319 单丝 WAAM 试样, 双丝试样的平均硬度提高 35%, 抗拉强度可增强 8% 以上, 屈服强度显著增加, 可增加 60% 以上, 但延伸率低, 如图 8 中所示。这是由于在 Al-Cu 合金中加入第三组元 Mg, 在结晶过程中形成 θ 和 S 两种相, 强化效果增大, 但由于 θ 和 S 相较脆, 使得双丝试样的塑性较差。由试样断口形貌可以看出, 试样 1 呈现沿晶脆性断裂特征, 并可观察到部分沿晶二次裂纹; 试样 2 能看到明显的河流花样, 属于准解理断裂 (图 9)。

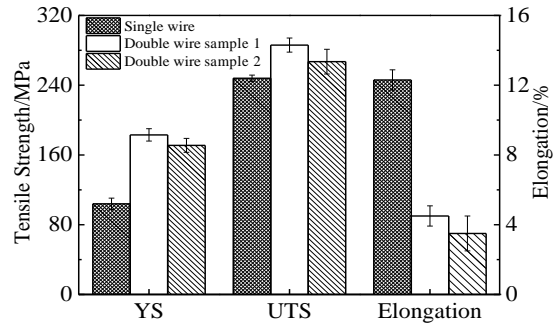


图 8 单丝 WAAM 2319 合金与双丝试样的力学性能
Fig.8 Tensile properties of WAAM alloys

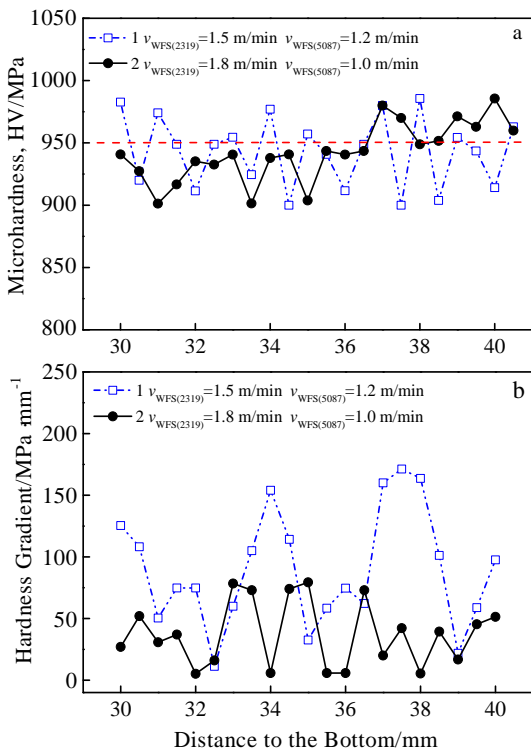


图 7 显微硬度分布与硬度梯度分布

Fig.7 Micro hardness (a) and its gradient distribution (b) of as-deposited Al-Cu-Mg alloy

表 3 Al-Cu-Mg 合金拉伸试验结果

Sample	YS/MPa	UTS/MPa	Elongation/%
1	183	286	4.5
2	171	267	3.5

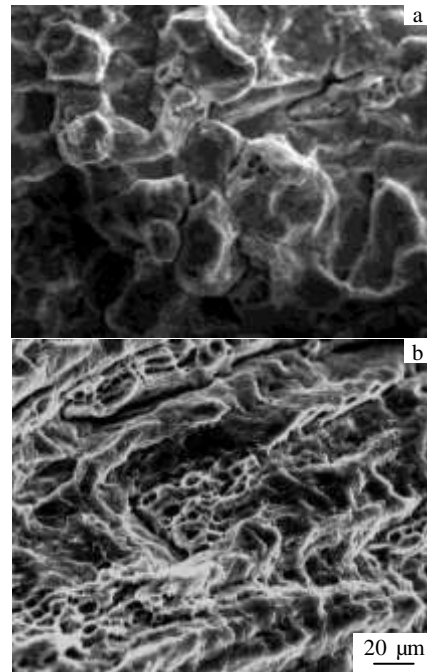


图 9 2 种试样拉伸断口形貌图

Fig.9 SEM fractograph morphologies for tensile fracture specimens: (a) sample 1 and (b) sample 2

3 结 论

- 1) 利用双丝 VP-GTAW 增材制造技术制备铝合金试样可提高成形效率且成形稳定。
- 2) 调节 Al-6.3Cu 和 Al-5Mg 的送丝速度, 可制备不同合金元素含量的 Al-Cu-Mg 合金。Mg 含量较低时 (1.74%), 合金中主要是 $\alpha+\theta$ 两相共晶体; Mg 含量较高时 (2.17%), 合金中主要是 $\alpha+S$ 两相共晶体。
- 3) 调节 2 种丝材 (Al-6.3Cu 和 Al-5Mg) 的送丝速度, 可实现对试样性能的控制。原始状态下试样的

显微硬度在 900~1000 MPa 之间, 抗拉、屈服强度分别可达到 286 和 183 MPa。与单丝 2319 WAAM 相比, 双丝试样的平均硬度提高 35%; 抗拉、屈服强度可分别增加 8% 和 60% 以上。

参考文献 References

- [1] Song Renguo(宋仁国). *Materials Review*(材料导报)[J], 2000, 14(1): 20
- [2] Williams S W, Martina F, Addison A C *et al. Materials Science and Technology*[J], 2016, 32(7): 641
- [3] Brandl E, Schoberth A, Leyens C. *Materials Science & Engineering A*[J], 2012, 532: 295
- [4] Cong Baoqiang(从保强), Ding Jialuo(丁佳洛). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(12): 3149
- [5] Cong B Q, Ding J L, Williams S W. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2015, 76(9-12): 1593
- [6] Cong Baoqiang(从保强), 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
- [7] Gu J L, Ding J L, Williams S W *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2016, 230: 26
- [8] Ouyang J H, Wang H, Kovacevic R. *Materials and Manufacturing Processes*[J], 2002, 17(1): 103
- [9] Wang H J, Jiang W H, Ouyang J H *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2004, 148(1): 93
- [10] Gu J L, Ding J L, Williams S W *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2016, 651: 18
- [11] Zhang Xiaofeng(张晓枫). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013
- [12] Cong Baoqiang(从保强), Su Yong(苏勇), Qi Bojin(齐铂金) *et al. Aerospace Manufacturing Technology*(航天制造技术)[J], 2016, 3: 29
- [13] Pickin C G, Williams S W, Prangnell P B *et al. Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2009, 14(8): 734
- [14] Li Niankui(李念奎), Ling Gao(凌杲), Nie Bo(聂波). *Aluminum Alloy Material and Heat Treatment Technology*(铝合金材料及其热处理技术)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012: 222

Microstructure and Properties of Double-Wires Plus Arc Additive Manufactured Aluminium Alloy Deposits Using VP-GTAW Process

Sun Hongye^{1,2}, Cong Baoqiang^{1,2}, Qi Zewu^{1,2}, Qi Bojin^{1,2}, Zhao Gang^{1,2}, Ding Jialuo³

(1. Beihang University, Beijing 100191, China)

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

(3. Cranfield University, UK MK430 AL)

Abstract: Double-wires plus arc additive manufacturing (D-WAAM) system for Al-Cu-Mg alloy using variable polarity gas tungsten arc welding (VP-GTAW) process was established. Al-6.3Cu and Al-5Mg wires were employed as filling metal. The microstructure and mechanical properties of as-deposited D-WAAM samples were analyzed. Results show that the excellent deposits wall samples can be achieved and the deposition efficiency can be improved by D-WAAM process. Al-Cu-Mg alloys with different element contents of copper and magnesium are obtained by adjusting the feed speed of the two wires. The microstructures of Al-Cu-Mg deposits are mainly composed of columnar dendrite and equiaxed dendrite grains with the non-uniform distribution characteristics. Mechanical properties can be enhanced due to the addition of alloying elements. The microhardness (HV) of as-deposited Al-Cu-Mg alloy is 900~1000 MPa. The UTS, YS and elongation of as-deposited D-WAAM alloy can be increased to 286 MPa, 183 MPa and 4.5%, respectively.

Key words: double-wires+arc additive manufacturing; Al-Cu-Mg alloy; microstructure; mechanical properties

Corresponding author: Cong Baoqiang, Ph. D., Associate Professor, School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, P. R. China, Tel: 0086-10-82338722, E-mail: cong bq@buaa.edu.cn