

Al-6.3Cu AC-GTAW 电弧增材成形的气孔控制

从保强^{1,2}, 孙红叶^{1,2}, 彭鹏^{1,2}, 齐铂金^{1,2}, 赵昱^{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 MK43 0AL)

摘要: 采用 AC-GTAW 工艺进行 Al-6.3Cu 铝合金电弧填丝单道多层成形试验, 针对不同热输入、空气和氩气两种环境及不同送丝速度条件, 研究过程参数及环境气氛对成形件内部气孔的影响。结果表明, 热输入对气孔的影响最大, 控制热输入能减少试件中气孔数量和大小; 在适当控制热输入条件下, 采用氩气环境和低送丝速度可显著减少内部气孔缺陷。试验发现, $I=125\text{ A}$, $v_{TS}=0.30\text{ m/min}$, 氩气环境下, $v_{WFS}=2.0\text{ m/min}$ 时, 气孔数量最少, 尺寸最小。

关键词: 铝合金; AC-GTAW; 增材制造; 气孔

中图分类号: TG47; TG146.2⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)05-1359-06

电弧填丝增材制造技术 (wire+arc additive manufacturing, WAAM) 具有沉积效率高、成形尺寸大、设备简单、制造成本低等优势, 已成为可实现高质量金属零件经济快速成形的的方法之一^[1,2]。高强铝合金因其具有高的比强度、比模量和良好的断裂韧性、抗疲劳、耐腐蚀等性能, 是航空航天领域重要的结构材料^[3]。近年国内外研究人员将 WAAM 技术用于制造铝合金构件已取得了一定进展。J. H. Ouyang, H. J. Wang 等^[4,5]采用 VP-GTAW 电弧对 Al-5Mg、Al-5Si 成形及组织性能进行了研究; J. L. Gu^[6]等研究了层间轧制及热处理对 CMT 电弧增材制造 Al-6.3Cu 合金构件力学性能的影响。姜云禄^[7]采用 CMT 工艺获得了尺寸精度较高、外形复杂的 Al-5Mg 合金试样。众所周知, 气孔是严重影响铝合金构件质量的主要缺陷之一, Mayer 等^[8]指出铝合金气孔是构件的裂纹源之一, 特别是直径大于 $50\ \mu\text{m}$ 的气孔。Toda, Kobayashi 等^[9,10]指出气孔对铝合金的疲劳性能和强度具有严重破坏影响。从保强等^[11,12]研究了 CMT 工艺对 Al-6.3Cu 合金增材制造气孔的影响; J. L. Gu 等^[13]采用层间轧制方法有效控制了 CMT WAAM 中的气孔。熔化极、非熔化极及等离子电弧均可作为热源用于 WAAM 制造过程, 已有研究表明, GTAW 用于铝合金增材制造可获得满意的成形质量, 但针对其气孔控制方面的研究甚少。为此, 本实验以铝铜合金为对象采用 AC-GTAW 工艺进

行 WAAM 试验, 研究环境和过程参数对铝合金构件气孔的影响, 研究结果可为有效解决铝合金 WAAM 气孔缺陷提高构件质量奠定基础。

1 实验

基板选用规格为 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 的 AA5083 平板, 材料选用直径 1.2 mm ER2319 (Al-6.3Cu), 其主要合金元素 (质量分数, %) 分别为: Cu 6.3, Mn 0.3, Zr 0.175, Ti 0.15, V 0.1, 余量 Al。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。图 1 所示为 AC-GTAW 电弧增材试验系统, 主要由 Migatronc 320 AC 交流电源、Migatronc KT4 冷送丝机、充氩箱、Zirconia Z230 氧

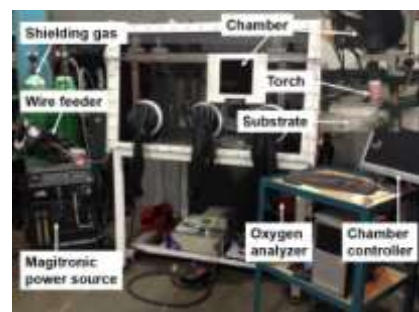


图 1 AC-GTAW 电弧增材试验系统

Fig.1 AC-GTAW WAAM system

收稿日期: 2016-05-05

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

作者简介: 从保强, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191, 电话: 010-82339961, E-mail: cong bq@buaa.edu.cn

气控制器、运动控制系统等部分组成。图 2 为实际使用的电弧电流和电压波形。

采用单道多层成形工艺制备沉积层试样，主要研究热输入 H_1 (heat input)、工作环境（空气、氩气）及送丝速度 v_{WFS} (wire feed speed) 等 3 个因素对 Al-6.3Cu 合金沉积层内部气孔缺陷的影响。热输入按照 $H_1 = \eta(\sum U_i I_i) / v_{TS}$ 公式^[14]计算，其中电弧热效率 $\eta = 0.7$ ^[15]， U_i 和 I_i 是制备各试件实际使用的工作电压和电弧电流， v_{TS} (travel speed) 为焊枪运动速度，试验中通过改变电弧电流和运动速度来控制热输入。室温条件下，分别在空气和氩气 (99.99%) 2 种环境下制备试样，对比分析工作环境对沉积层气孔的影响。具体试验参数分别见表 1 和表 2。其他工艺参数为：交流电流频率 100 Hz，正极性电流持续时间比 70%， $\Phi 3.2$ mm W-Ce 电极，电弧长度约 5 mm，焊枪保护气体 Ar (99.99%) 流量 15 L/min，氩气环境下保持充氩箱内氧含量 20 $\mu\text{L/L}$ ，制备试件长度 120 mm。

在试件中部沿平行于运动方向切取横向截面，试样经打磨、抛光 (SiO_2 悬浮液) 后，在 Nikon OPTIPHOT 显微镜下观察气孔并拍照，使用 Kroll's 试剂 (HNO_3 6 mL; HF 2 mL; H_2O 92 mL) 浸蚀试样并在 Nikon OPTIPHOT 显微镜及 Philips XL30 扫描电镜下观察组织及气孔分布特征。取试样中间部位约 45 mm^2 面积区域用于表征试样 (图 3a)，采用 Imagepropuls 软件测量并计算气孔数目及其直径尺寸 d (图 3b)。

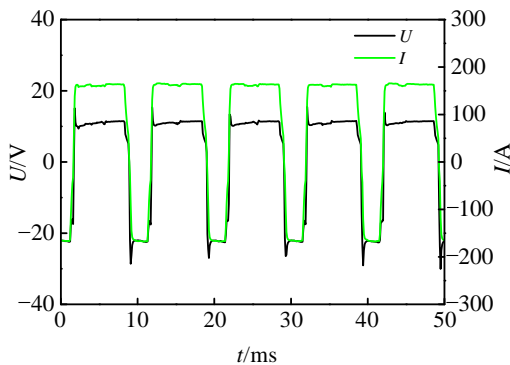


图 2 AC-GTAW 电弧电流和电压波形

Fig.2 Arc current and voltage waveforms of AC-GTAW

表 1 空气环境中工艺参数

Table 1 Parameters in common air environment

Serial No.	I/A	$v_{WFS}/\text{m min}^{-1}$	$v_{TS}/\text{m min}^{-1}$	$H_1/\text{J mm}^{-1}$	Layer number
C1	145	1.3	0.21	378.6	26
C2	135	1.8	0.21	353.9	17
C3	145	2.2	0.3	265.0	12
C4	120	2.0	0.3	222.3	21

表 2 氩气环境中工艺参数

Table 2 Parameters in argon environment

Serial No.	I/A	$v_{WFS}/\text{m min}^{-1}$	$v_{TS}/\text{m min}^{-1}$	$H_1/\text{J mm}^{-1}$	Layer number
A1	120	1.6	0.21	318.6	23
A2	125	1.8	0.21	330.9	19
A3	125	2.0	0.3	231.6	20
A4	125	2.4	0.3	231.6	20

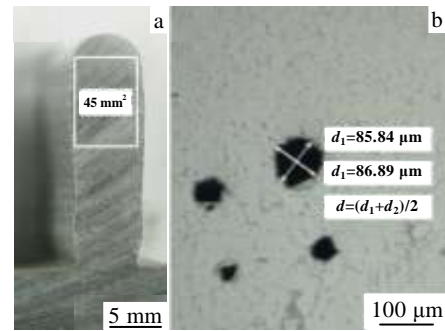


图 3 气孔计算示意图

Fig.3 Calculation of porosity: (a) area for calculation and (b) diameter of gas pore

2 结果与分析

2.1 热输入对 AC-GTAW WAAM 气孔的影响

图 4 和图 5 分别为空气和氩气环境下 AC-GTAW 增材制造试件内部的部分气孔分布图，气孔数量和直径尺寸统计结果见图 6。从图 6a 可以看出，空气环境下 C3 ($H_1=265.0 \text{ J/mm}$, $v_{WFS}=2.2 \text{ m/min}$) 的气孔数量最少且尺寸最小，仅存在一定量的 $50 \mu\text{m}$ 以下的小气孔和几个 $50 \mu\text{m}$ 以上大气孔；随着热输入的逐渐降低，试件气孔的数量从 278 (C2) 减少到 125 (C3) 且直径尺寸也呈现减小的趋势，氩气环境下的气孔分布也具有相似特征。但随着热输入的进一步降低，气孔数量增加到 275 (C4)。

进一步研究发现，逐层堆积成形的 Al-6.3Cu 铝合金试样组织由等轴晶粒组成，气孔主要分布在层间重熔区域部位 (图 7a)，且呈现出沿等轴晶粒晶界分布的明显特征 (图 7b)。已有研究表明，铝合金内部气孔主要是氢气孔，当含氢量一定时，氢气孔形核率及其尺寸与沉积层组织晶粒尺寸有重要关系，而热输入是影响晶粒大小的一个关键参数^[16]。在 AC-GTAW 电弧填丝增材过程中，层间界面组织发生重熔再凝固过程，其重熔凝固界面将可作为有效的形核质点。与试件 C1 ($H_1=378.6 \text{ J/mm}$) 和 C2 ($H_1=353.9 \text{ J/mm}$) 相比，

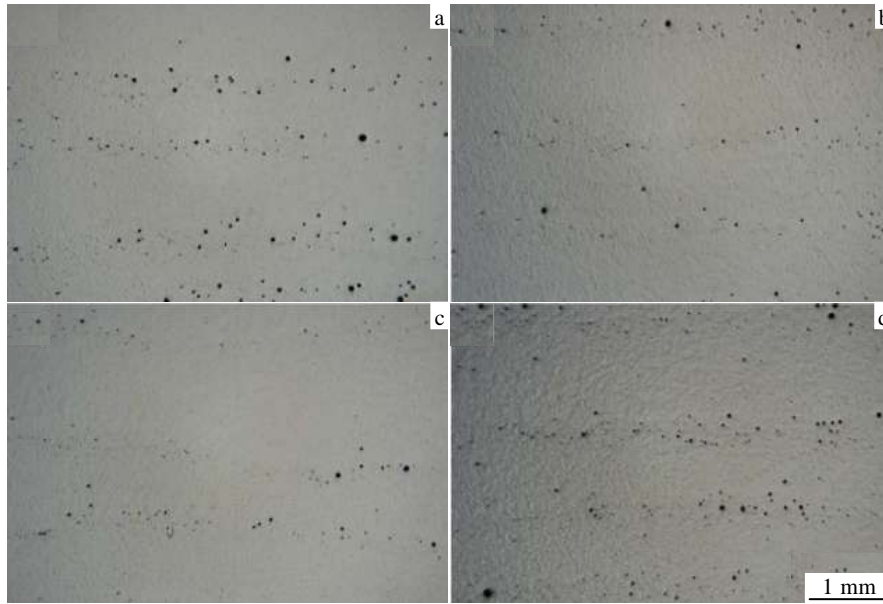


图 4 空气环境下不同工艺参数的 AC-GTAW WAAM 试样气孔分布

Fig.4 Transverse porosity with different parameters in common air environment: (a) C1: $v_{TS} = 0.21$ m/min, $I = 145$ A, $v_{WFS} = 1.5$ m/min, $H_I = 378.6$ J/mm; (b) C2: $v_{TS} = 0.21$ m/min, $I = 135$ A, $v_{WFS} = 1.8$ m/min, $H_I = 353.9$ J/mm; (c) C3: $v_{TS} = 0.30$ m/min, $I = 145$ A, $v_{WFS} = 2.2$ m/min, $H_I = 265.0$ J/mm; (d) C4: $v_{TS} = 0.30$ m/min, $I = 120$ A, $v_{WFS} = 2.0$ m/min, $H_I = 222.3$ J/mm

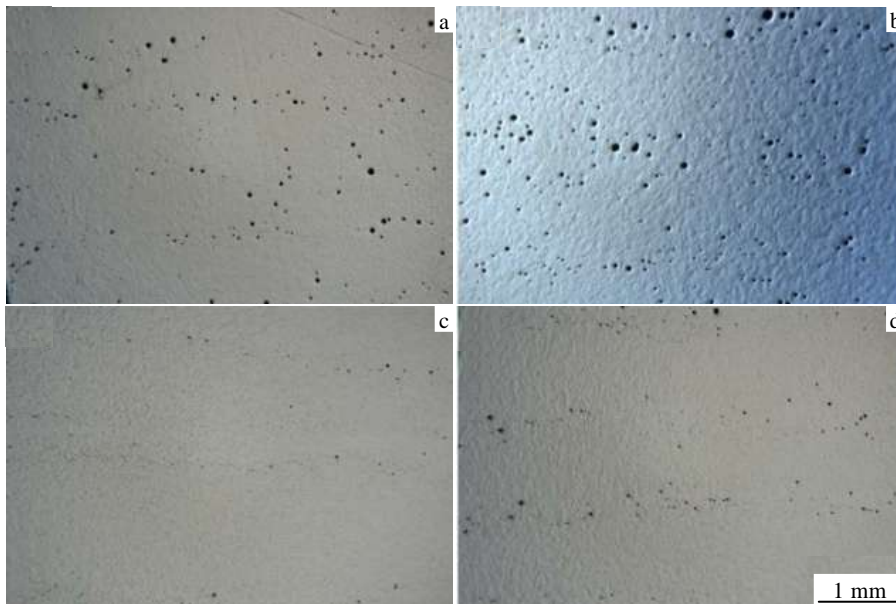


图 5 氩气环境下不同工艺参数的 AC-GTAW WAAM 试样气孔分布

Fig.5 Transverse porosity with different parameters in argon environment: (a) A1: $v_{TS} = 0.21$ m/min, $I = 120$ A, $v_{WFS} = 1.6$ m/min, $H_I = 318.6$ J/mm; (b) A2: $v_{TS} = 0.21$ m/min, $I = 125$ A, $v_{WFS} = 1.8$ m/min, $H_I = 330.9$ J/mm; (c) A3: $v_{TS} = 0.30$ m/min, $I = 125$ A, $v_{WFS} = 2.0$ m/min, $H_I = 231.6$ J/mm; (d) A4: $v_{TS} = 0.30$ m/min, $I = 125$ A, $v_{WFS} = 2.4$ m/min, $H_I = 231.6$ J/mm

C3 热输入显著降低, 而随着热输入的降低, 单层凝固组织晶粒尺寸明显减小 (如图 8 所示)。根据李正扬等^[17]学者的研究, 气孔与晶粒间存在竞争生长关系,

晶粒细化可有效限制液态金属中氢的扩散, 从而限制氢气孔的形核和长大, 因而随着热输入的降低, 沉积层内气孔的尺寸和数量均明显减少。但当通过减小电

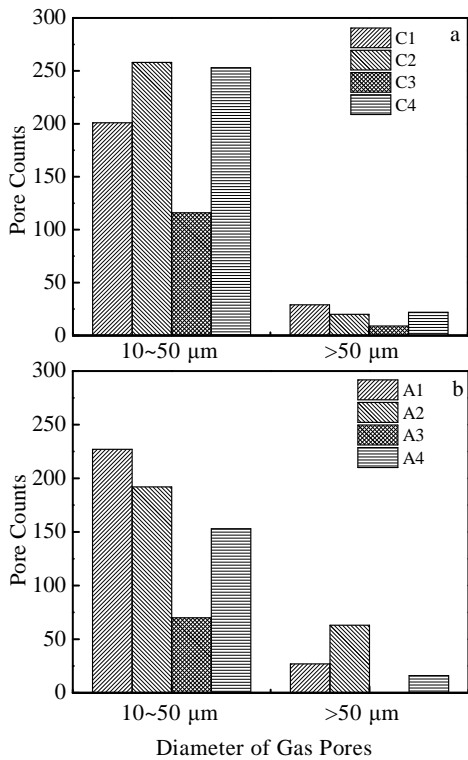


图 6 AC-GTAW WAAM 试样气孔尺寸分布

Fig.6 Pore counts for as-deposited samples: (a) common air environment and (b) argon environment

弧电流使热输入降低至 222.3 J/mm (C4) 时, 试件中 小气孔的数量显著增加, 同时还存在少量的大尺寸气孔。分析认为, 首先, 与变极性电弧不同, AC-GTAW 正负极性电流幅值相同, 根据耿正等^[18]学者的研究, 负极性电流幅值大小对清理铝合金表面氧化膜起主要作用。与 C1~C3 相比, 试件 C4 采用的电弧电流仅为 120 A, 致使交流电弧对铝合金丝表面氧化膜的清理长度明显减小 (如图 9 所示), 清理效果变差, 而未被清理的高熔点氧化膜进入熔池后将可作为高效形核质点促进气孔的形成; 其次, AC-GTAW 电弧对熔池液态金属同样具有脉动作用, 电流幅值的减小使电弧对熔

池的搅拌作用减弱, 不利于气孔的上浮逸出; 最后, 随着热输入的大幅降低, 熔池液态金属在高温区域的停留时间过短, 从而致使气孔形核后来不及长大和逸出, 其气孔直径主要在 10~50 μm 范围内。因此, 为减少氢气孔缺陷, 热输入必须控制在一个合适的范围。

2.2 工作环境对 AC-GTAW WAAM 气孔的影响

对比空气环境 (图 4) 和氩气环境 (图 5) 中试件内部的气孔分布可知, 氩气环境下 $I=125\text{A}$, $v_{TS}=0.30\text{ m/min}$, $v_{WFS}=2.0\text{ m/min}$, 即试件 A3 内部气孔数量最少且其直径尺寸最小, 仅存在直径为 50 μm 以下的气孔, 相较于空气环境下 C3 试件内部的气孔缺陷得到一定程度的改善。 H_1 较低时 (C4, 222.3 J/mm 和 A3, 231.6 J/mm), 试件 A3 内部的气孔数量相较于 C4 减少了 74%, 且气孔尺寸主要在 50 μm 以下; H_1 较高时 (C1/C2, 353.9~378.6 J/mm 和 A1/A2, 318.6~330.9

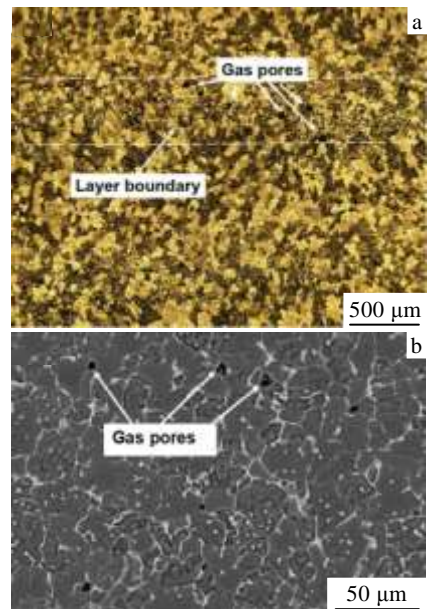


图 7 试样 C1 显微组织

Fig.7 Micrographs of C1: (a) optical image and (b) SEM image for the inter-layer region

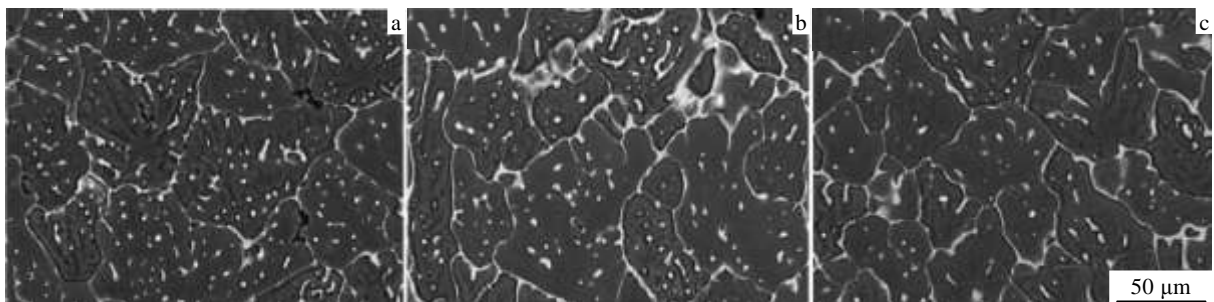


图 8 AC-GTAW WAAM 试样晶粒组织

Fig.8 SEM image of as-deposited samples: (a) C1: $H_1=378.6\text{ J/mm}$, (b) C2: $H_1=353.9\text{ J/mm}$, and (c) C3: $H_1=265.0\text{ J/mm}$

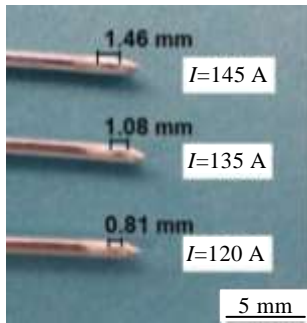


图9 ER2319 丝材送进端部的氧化膜清理长度

Fig.9 Oxide cleaning effect on ER2319 wire ($v_{WFS}=2.1$ m/min)

J/mm), 与空气环境下试件 C1、C2 相比, 氩气环境下试件 A1 和 A2 内部的气孔缺陷并未改善, 同时直径尺寸 $50\ \mu\text{m}$ 以上的气孔数量却显著增加。上述试验测试结果说明, 在 H_1 较低时, 氩气环境中 Al-6.3Cu 试件内部的气孔缺陷相对于空气环境中有明显改善, 但当 H_1 较高时, 氩气环境中试件的气孔缺陷依然严重。分析认为, 在铝合金电弧填丝增材制造过程中, 形成氢气孔的氢元素主要来源于铝合金丝材、焊枪保护氩气和周围空气等 3 方面所含的水分。在焊枪保护氩气气体纯度一定时, 氩气环境(氧含量 $20\ \mu\text{L/L}$)可有效保证降低工作环境的氢含量, 同时如前 2.1 节中所述, 低热输入有效抑制了氢气孔的长大, 因此低热输入时气孔缺陷得到明显改善。但受限于 AC-GTAW 固有的波形特征, 铝合金丝材表面难以获得满意的清理效果, 导致丝材内部及表面吸附的水分和保护气体中的水分进入熔池, 在高热输入的综合作用下产生较多且尺寸

较大的氢气孔。以上结果分析表明, 在热输入控制适当条件下, 氩气环境有助于改善 Al-6.3Cu 铝合金 AC-GTAW 增材试件的内部气孔缺陷。

2.3 v_{WFS} 对 AC-GTAW WAAM 气孔的影响

对比试件 A1 和 A2、试件 A3 和 A4 内部的气孔尺寸和数量分布图, 可以看出, 在热输入水平相当条件下, v_{WFS} 从 $1.6\ \text{m/min}$ (A1) 增加到 $1.8\ \text{m/min}$ (A2) 时, 直径达 $50\ \mu\text{m}$ 以上的气孔数量增加了 57%; v_{WFS} 从 $2.0\ \text{m/min}$ (A3) 增加到 $2.4\ \text{m/min}$ (A4) 时, 气孔数量增加了 141%。进一步分析 ER2319 丝材表面和内部特征发现, 受限于铝合金丝材的冶炼制备工艺过程, 使得丝材表面存在一定数量的凹坑, 易吸附杂质和水分, 同时丝材内部也存在大量孔隙(图 10)。提高 v_{WFS} 即表示丝材的熔化量相应增大, 同时由于 AC-GTAW 电弧对丝材表面的清理效果不佳, 极易导致熔池中的杂质、氢和氧化物等含量的增加, 促使氢气孔的形核率明显提高, 并导致气孔尺寸的增大。因此, 在热输入一定的条件下, 降低并适当控制 v_{WFS} 将有利于减少铝合金电弧增材成形过程中的气孔缺陷。

从试件 C1、C2 和 C3 气孔尺寸和数量分布图可以看出, 当热输入 H_1 从 $378.6\ \text{J/mm}$ 减少至 $353.9\ \text{J/mm}$, v_{WFS} 从 $1.5\ \text{m/min}$ 增加至 $1.8\ \text{m/min}$, 气孔总数量增加 21%, 而大气孔(直径大于 $50\ \mu\text{m}$)的数量减少 31%。说明 v_{WFS} 主要影响气孔的数量, 热输入影响气孔的大小。当热输入 H_1 继续降低至 $274.8\ \text{J/mm}$, 而与之相对地, v_{WFS} 增加至 $2.2\ \text{m/min}$, 气孔总数量却减少了 45%, 大气孔数量则减少了 68%。上述分析说明热输入 H_1 比 v_{WFS} 对气孔缺陷的影响大。

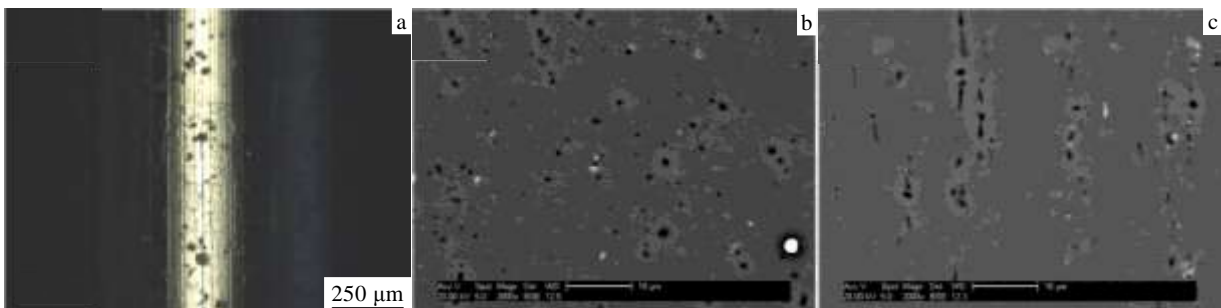


图10 ER2319 丝材表面及内部特征

Fig.10 Surface and internal features of ER2319 wire: (a) surface, (b) transverse section, and (c) longitudinal section

3 结 论

1) 在 Al-6.3Cu 铝合金电弧填丝增材成形过程中, 通过控制热输入、工作环境及送丝速度等 3 个因素可

有效控制成形试件内部的气孔缺陷。

2) 3 因素中, 热输入对气孔缺陷的影响最大, 控制热输入可有效减少气孔数量及其尺寸。

3) 在控制热输入的前提下, 采用氩气环境能明显

改善 AC-GTAW WAAM 成形过程中的气孔缺陷, 同时, 适当控制送丝速度也有助于减少 Al-Cu 合金 WAAM 过程的气孔缺陷。

参考文献 References

- [1] Ding J, Colegrove P, Mehnen J *et al.* *Comp Mater Sci*[J], 2011, 50: 3315
- [2] Williams S W, Martina F, Addison A C *et al.* *Mater Sci Technol* [J], 2016: 1
- [3] Zhang Xinming(张新明), Liu Shengxu(刘胜胆). *Materials China*(中国材料进展)[J], 2013, 32: 39
- [4] Ouyang J H, Wang H J, Kovacevic R. *Mater Manuf Process* [J], 2002, 17: 103
- [5] Wang H J, Jiang W H, Ouyang J H. *J Mater Process Technol*[J], 2004, 148: 93
- [6] Gu J L, Ding J, Williams S W. *et al.* *Mater Sci Eng A*[J], 2016, 651: 18
- [7] Jiang Yunlu(姜云禄). *Research on the Rapid Prototyping Technology and Forming Process of Aluminum Alloy Based on the CMT*(基于冷金属过渡技术的铝合金快速成形技术及工艺研究)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013
- [8] Mayer H, Papakyriacou M, Zettl B *et al.* *Inter J Fatig*[J], 2003, 25(3): 245
- [9] Toda H, Oogo H, Uesugi K. *Mater Trans*[J], 2009, 50: 2285
- [10] Kobayashi M, Dorce Y, Toda H. *Mater Sci Technol*[J], 2010, 26(8): 962
- [11] 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(12): 3149
- [12] Cong B Q, Ding J L, Williams S W. *Inter J Adv Manuf Technol*[J], 2015, 76(9-12): 1593
- [13] Gu J L, Ding J, Williams S W *et al.* *J Mater Process Technol*[J], 2016, 230: 26
- [14] Pe ĩe N, Egerland S, Colegrove P A *et al.* *Sci Technol Weld Join*[J], 2011, 16(5): 412
- [15] DuPont J N, Marder R. *Weld Research Suppl*[J], 1995, 12(s): 406
- [16] Xu Lianghong(许良红), Tian Zhiling(田志凌), Zhang Xiaomu(张晓牧) *et al.* *Transactions of the China Welding Institute*(焊接学报)[J], 2006, 27(12): 69
- [17] Li Zhengyang(李正扬), Zhu Minfang(朱鸣芳), Dai Ting(戴挺). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2013, 49(9): 1032
- [18] Geng Zheng(耿正), Zhang Guangjun(张广军), Deng Yuanzhao(邓元召) *et al.* *Transactions of the China Welding Institute*(焊接学报)[J], 1997, 18(4): 232

Porosity Control of Wire + Arc Additively Manufactured Al-6.3Cu Alloy Deposition Using AC-GTAW Process

Cong Baoqiang^{1,2}, Sun Hongye^{1,2}, Peng Peng^{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 MK43 0AL)

Abstract: Al-6.3Cu alloy straight wall samples were produced using AC-GTAW process. The influence of heat input, environmental atmosphere, and wire feed speed on porosity characteristics of deposition samples were investigated. Results show that heat input is the most important factor affecting the porosity defect. Gas pore counts and their diameter can be reduced with proper heat input. With lower heat input, the gas pores can be further reduced in argon environment and at lower wire feed speed. The experimental results demonstrate that in argon environment, at travel speed of 0.30 m/min and wire feed speed of 2.0 m/min, the gas pores can be controlled effectively.

Key words: aluminum alloy; AC-GTAW; additive manufacturing; porosity

Corresponding author: Peng Peng, Ph. D., Associate Professor, School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, P. R. China, Tel: 0086-10-82339961, E-mail: ppeng@buaa.edu.cn