

选区激光熔化成形 Al-Mg-Sc-Zr 合金 TIG 焊接的组织与性能

杨君¹ 田承鑫² 张慧敏¹ 李峰¹ 刘紫阳¹ 田志杰^{1,3*}

(1. 首都航天机械有限公司, 北京 100076; 2. 山东交通学院交通土建工程学院, 济南 250357;
3. 先进焊接与连接国家重点实验室, 北京 100076)

摘要: 以5B71 合金焊丝为填充材料, 采用钨极惰性气体保护 (TIG) 焊接工艺对1.2 mm 厚激光选区熔化技术 (Selective Laser Melting, SLM) 制备的板材进行焊接, 对焊接接头的显微组织演变及细化特征进行研究。结果表明: 采用合理的TIG焊接参数焊接的SLM增材Al-Mg-Sc-Zr试件, 焊缝正面靠近表面位置和焊接接头熔合线位置, 分布着数量较多的气孔, 最大直径达到0.3 mm, 焊接接头熔合线附近的气孔夹渣数量和尺寸大小均大于母材, 焊缝内部的气孔夹渣数量少于其他区域; 焊缝中Sc和Zr微合金元素改善了组织晶粒大小, 为等轴晶; 熔合线的晶粒为柱状晶, 柱状晶晶粒尺寸约为80~100 μm 。焊缝断口呈现脆韧性复合断裂形貌, 断裂面气孔密集, 未发现明显的剪切唇, 气孔周围断面存在明显韧窝组织, 部分韧窝内发现强化相颗粒, 气孔内部存在尖锐裂纹源。

关键词: Al-Mg-Sc-Zr 铝合金; TIG; 微观组织; 晶粒

中图分类号: TG442 **文献标识码:** A

Microstructure and Performance of Selective Laser Melting Formed Al-Mg-Sc-Zr Alloy TIG Welding

Yang Jun¹ Tian Chengxin² Zhang Huimin¹ Li Feng¹ Liu Ziyang¹ Tian Zhijie^{1,3*}

(1. Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076;
2. School of Transportation and Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357;
3. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Beijing 100076)

Abstract: A selective laser melting (SLM) formed 5B70 aluminum alloy sheet with 1.2 mm thickness was welded by tungsten inert gas (TIG) welding with 5B71 filler wire. The microstructure evolution and refinement characteristics of the welded joints were investigated. The research results indicated that, for the SLM Al-Mg-Sc-Zr sheets by adopting reasonable TIG welding parameters, a lots of pores were distributed in the joints nearing the reverse side and the bond line, in which the largest pore was 0.3 mm in diameter. Compared with the parent material, the material nearing the bond line had more pores and slags as well as larger pores and slags. Less pores and slags was found in joints than the other areas. The Sc and Zr elements in the joints could improve the micro-structure, resulting in equiaxed grains. The grains in the bond line were columnar crystal, with a diameter of 80~100 μm . A mixed fracture characteristics of the tough and brittle was noted on fractograph of the weld fracture surface, in which some distinctive dimples were found among the pore fracture surface, some strengthening phase particles were found in partial dimple, sharpened cracks were found in pore internal.

Key words: Al-Mg-Sc-Zr alloy; TIG; microstructure; grain

1 引言

通过激光扫描粉末床, 制造复杂形状零件的激光选

区熔化技术 (Selective Laser Melting, SLM), 是利用三维软件设计的零件模型, 采用逐层加粉堆积熔融的方式进行金属 3D 打印成形的工艺技术, 它可加工异型尺寸

零件,使其表面质量均匀、性能优良,已被许多国家推广应用于航空航天领域。目前在 SLM 成形高强铝合金的综合性能评价研究中,主要集中于通过参数优化、程序改进以及结构件的局部修补等减少缺陷、抑制裂纹及细化晶粒,从而改善合金的力学性能等方面;而对于 SLM 成形高强铝合金的焊接性能,也是其研究的重要分支之一。

国内外对 Al-Mg-Sc 合金钣金件的焊接工艺研究也在持续开展并推进中^[1-2],相关学者已经进行了钨极惰性气体保护(TIG)焊、变极性等离子(VPPA)焊、搅拌摩擦焊(FSW)等适用性研究,并对 Sc 和 Zr 进行了铝基体晶粒组织演化影响的分析,朱凯等^[3]指出氩弧焊焊接接头抗拉强度提高 20%;苏志强等^[4]、Xu Pian 等^[5]研究了 VPPA 及 FSW 接头力学性能及断裂特征,接头强度系数大于 0.74;Johannes Taend 等^[6]、Chen Jiqiang 等^[7]、Jiang Jingyu 等^[8]采用合理的焊接参数,研究了搅拌摩擦接头组织与拉伸性能,发现了焊核区 1 μm 的晶粒及 10 nm 的弥散相;Zhao Juan 等^[9]分析比较了 FSW 与 TIG 焊的拉伸性能,指出 FSW 焊的优势,焊缝比 TIG 焊缝屈服强度值高。Xu Pian^[10]、Buranova Y^[11]、Sun Fangfang 等^[12]研究了铸态及变形两种情况下第二相的沉淀行为、强化演变及粗化现象。

本文开展了 SLM 增材制造的 Al-Mg-Sc-Zr 试板手工钨极氩弧焊(TIG)工艺研究,进行接头组织观察,研究了熔焊界面、焊缝及热影响区微观组织演变过程,分析了接头拉伸断裂机制。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

选用 Al-Mg-Sc-Zr 合金粉末,采用 SLM 技术打印试验试板,按照长、宽方向打印出 250 mm×250 mm 和厚度方向 60 mm 的试件,最后采用电火花线切割方法加工成尺寸为 200 mm×100 mm×1.2 mm 的焊接试板。

对打印后的试板进行标准热处理退火。用于填充焊缝熔池的焊丝牌号选择 5B71,焊丝直径为 Φ2.0 mm。惰性保护气体为高纯 Ar 气,纯度≥99.999%。焊接试板和填充焊丝的化学成分如表 1 所示。

表 1 Al-Mg-Sc-Zr SLM 试板和 5B71 焊丝

成分	化学成分						%
	Mg	Mn	Sc	Zr	Cu	Zn	
SLM 试板	4.5	0.54	0.66	0.37	<0.05	<0.05	余量
5B71	5.8~6.8	0.3	0.3~0.4	0.05~0.15	<0.05	<0.05	余量

2.2 焊接试验

焊接前采用化学试剂表面处理方法进行清理,清洗介质及浓度为:氢氧化钠 100~200 g/L。将试板正反面焊接区域内采用钢丝刷进行表面打磨清理,去除毛刺、划痕、尘土等多余物,并用刮削刀去除表面氧化层,再用无水乙醇擦拭清理干燥后手工钨极氩弧焊方式焊接试板,焊接电源型号为 Miller Dynasty351,焊接参数为:焊接电流 38~50 A、Ar 气流量 6 L/min、焊接速度约 100~140 mm/min。

2.3 实验仪器

对 TIG 焊接试板,采用线切割加工方法沿垂直于焊缝方向切取金相试样,对观察面进行抛光并化学侵蚀(HF:HCl:HNO₃:H₂O=2:3:5:190),使用光学显微镜观察焊缝各区域的组织形态。采用扫描电子显微镜对断口进行拍照分析。

3 试验结果与分析

3.1 母材截面

Al-Mg-Sc-Zr SLM 试板母材横截面如图 1 所示,层间界线明显,错落分布的层间布置有利于 3D 打印成形,但导致层间夹角更加尖锐,错层附近热影响区位置晶粒大小比本体更加粗大^[10],不仅层间界线处存在未熔合、气孔等缺陷,甚至产生较大面积的虚焊处。层内组织中也产生一定数量的结合缺陷。

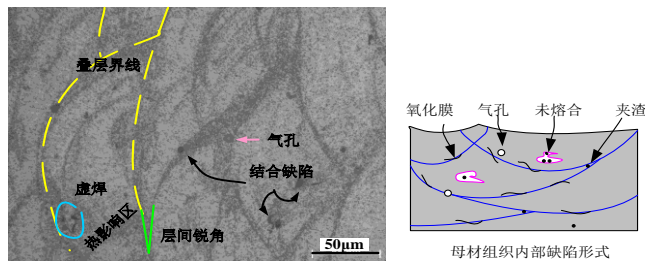


图 1 增材试板母材横截面表面光学影像及母材内部缺陷

由于试板打印过程中,激光能量未能完全熔化足量的金属粉末,层与层之间不可避免的夹杂粉末颗粒物,难以形成致密重熔结构,导致部分区域产生不规则的孔洞、夹杂。当激光第二次扫描时,熔池内能量分布不均匀,部分粉末在未融化的情况下,被包敷在熔池中,形成形状不规则的未熔合缺陷。而球形气孔缺陷是粉末在融化凝固时包含了微量的保护气体以及焊接环境中湿度引起的。另一方面,位于激光扫描路径上的粉末熔体产生气化现象,熔池内部形成匙孔塌陷,形成形状规则

的金属蒸气气泡,没有充足的时间溢出,残留在熔池内部,形成气孔。因此,SLM 试板内部是一个容纳了气孔、夹杂以及薄弱结合的疏松组织。

3.2 焊缝形貌

图 2 为 TIG 焊缝横截面宏观相貌,可以看出,焊缝宽度约 5 mm、正面余高约 0.8 mm,焊缝正面靠近表面位置和焊接接头熔合线位置,分布着数量较多的气孔、夹杂以及薄弱结合的疏松组织,越靠近表面位置,气孔直径有增大的趋势,最大直径达到 0.3 mm,焊接接头熔合线附近,目视可见的气孔夹杂数量也高于母材;焊缝内部位置处,目视可见的气孔夹杂数量少于其他区域。

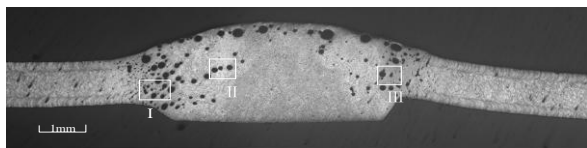


图 2 增材试板 TIG 焊缝截面

3.3 接头的微观组织

图 3 为焊接接头微观组织形貌。可以看出,焊缝组织由等轴晶粒构成,尺寸均匀,Sc 和 Zr 微合金元素改善了组织晶粒大小^[5,9,12]。熔体中生成的 Al₃(Sc, Zr) 颗粒既可作为 α -Al 的晶粒细化剂、弥散颗粒起到抑制再结晶晶粒长大的作用,也可作为析出强化相共晶存于基体^[14-17]。从图 3a、3c 可知,焊缝组织靠近熔合线附近产生大量气孔且直径高达 0.1~0.2 mm,这些气孔的来源为母材本身原有的微气孔、层间氧化膜等,随着熔池的液化,迅速聚集成大体积气孔散布在熔池中。气孔在液体熔池中可从内部溢出,所以焊缝中心部位气孔较少,未及时溢出的气孔固封在焊缝表面,形成表面气孔。熔合线附近的气孔由于其非完全液化状态,溢出难度加

大,从而滞留在焊缝内部,形成内部气孔。

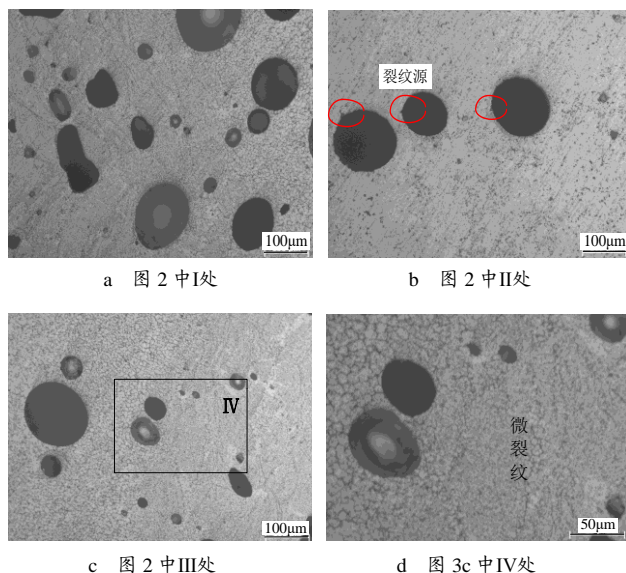


图 3 接头微观组织

由图 3a、3c 可见焊接接头熔合线的晶粒为柱状晶,由于焊接过程中热输入增加,促进了熔合线区域晶粒的增长,但是此处为固液相间的部分熔化区,Sc 和 Zr 细化作用比焊缝处薄弱,晶粒尺寸比焊缝处大,尺寸约为 80~100 μm 。熔合线附近出现的未熔合、气孔、夹杂等缺陷,是在母材组织基础上气孔、夹杂、未熔合、氧化膜的聚集与发展^[18-19]。这些缺陷在焊接过程中,从母材均匀分布状态团聚成大体积缺陷,尺寸明显大于母材本身,见图 4a、4b。单个气孔尺寸约达到 0.1 mm 左右。同时,气孔周边生成尖锐裂纹源,见图 3 d。在熔合线附近,由于晶粒凝固,晶间产生拉力,易产生潜在的凝固微裂纹,见图 4c。

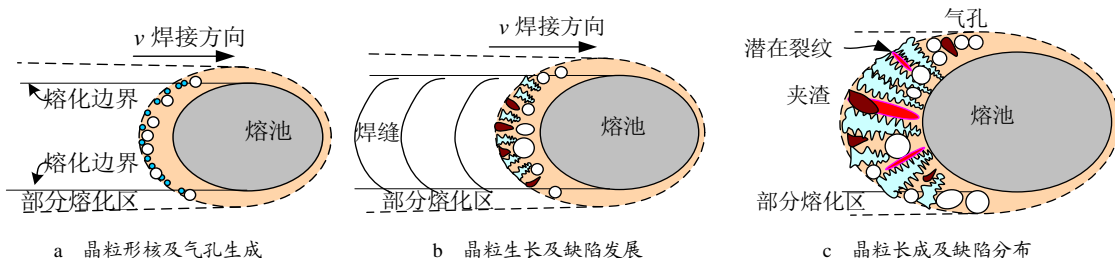


图 4 焊缝缺陷产生机理

3.4 断口分析

对母材及焊接接头标准试样进行拉伸试验,母材抗拉强度值为 452~460 MPa,而焊接接头的抗拉强度为 244~279 MPa。采用扫描电镜 (SEM) 对断口进行分析。断口形貌见图 5,由图 5 可见断口呈现脆断形貌。断裂截面为垂直剪切断裂,从拉伸件的宏观断口来看,

断裂面气孔密集、金属光泽较弱、其上有细小的凹凸。由于试件较薄,断面未发现明显的剪切唇,但表层断面存在撕裂棱,内部断面存在明显韧窝组织,气孔内部有裂口存在,与图 3b 的裂纹源相对应,如图 5b 所示;部分韧窝内发现强化相颗粒,可以确定其属于塑性韧窝断裂如图 5c 所示,断口为脆韧性复合断裂^[5]。

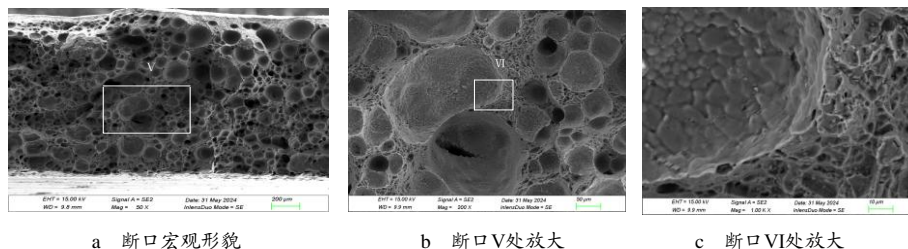


图5 焊接接头断口形貌

4 结束语

a. 采用 TIG 工艺焊接的 SLM 增材 Al-Mg-Sc-Zr 试件, 缺陷产生率较高, 可焊性不佳, 焊缝正面靠近表面位置和焊接接头熔合线位置, 分布着数量较多的气孔, 最大直径达到 0.3 mm, 焊接接头熔合线附近的气孔夹渣数量和尺寸均大于母材, 焊缝内部的气孔夹渣数量少于其他区域。

b. 焊缝中 Sc 和 Zr 微合金元素改善了组织晶粒大小, 为等轴晶; 熔合线的晶粒为柱状晶, 柱状晶晶粒尺寸约为 80~100 μm 。

c. 焊缝断口呈现脆韧性复合断裂形貌, 断裂面气孔密集, 未发现明显的剪切唇, 表层断面存在撕裂棱, 内部断面存在明显韧窝组织, 部分韧窝内发现强化相颗粒, 气孔内部产生尖锐裂纹源。

参考文献

- [1] Spierings A B, Dawson K, Dumitraschkewitz P, et al. Microstructure characterization of SLM-processed Al-Mg-Sc-Zr alloy in the heat treated and HIPed condition[J]. Additive Manufacturing, 2008(20): 173-181.
- [2] 姜锋, 赵娟, 赛海根, 等. 焊后热处理对 Al-Mg-Sc 合金板材焊接接头组织与力学性能的影响[J]. 金属学报, 2008, 44(10): 1277-1280.
- [3] 朱凯, 王祝堂. 钪的研究进展及其在铝合金中的应用[J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(2): 1-9.
- [4] 苏志强, 张玉芝, 田志杰, 等. 5B70 铝镁钪合金搅拌摩擦焊接接头组织与性能[J]. 焊接技术, 2017, 46(11): 32-35.
- [5] Xu Pian, Jiang Feng, Meng Song, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Sc-Zr alloy variable polarity plasma arc welding joint[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(9): 4783-4790.
- [6] Johannes T, Cecilia P. Influence of $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ precipitates on deformability and friction stir welding behavior of Al-Mg-Sc-Zr Alloys[J]. BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte, 2016, 161(7): 330-333.
- [7] Chen Jiqiang, Li Shengci, Cong Hailong, et al. Microstructure and mechanical behavior of friction stir-welded sc-modified Al-Zn-Mg alloys made using different base metal tempers[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(2): 916-925.
- [8] Jiang Jingyu, Jiang Feng, Zhang Menghan. Microstructure evolution and mechanical properties of Al-Mg-Sc-Zr alloy sheet after friction stir welding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023(33): 1687-1700.
- [9] Zhao Juan, Jiang Feng, Jian Haigen, et al. Comparative investigation of tungsten inert gas and friction stir welding characteristics of Al-Mg-Sc alloy plates[J]. Materials and Design, 2010, 31(1): 306-311.
- [10] Xu Pian, Jiang Feng, Tang Zhongqin, et al. Coarsening of Al_3Sc precipitates in Al-Mg-Sc alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019(781): 209-215.
- [11] Buranova Y, Kulitskiy V, Peterlechner M, et al. $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ -based precipitates in Al-Mg alloy: Effect of severe deformation[J]. Acta Materialia, 2017(124): 210-224.
- [12] Sun Fangfang, Guiru L N, Li Qunying, et al. Effect of Sc and Zr additions on microstructures and corrosion behavior of Al-Cu-Mg-Sc-Zr alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(9): 1015-1022.
- [13] Brandon B, Chaudhar A B, Sudarsanam S B, et al. Defect characterization through automated laser track trace identification in slm processes using laser profilometer data[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(2): 717-727.
- [14] 宋立奇, 史运嘉, 蔡彬, 等. 激光选区熔化成形制备高强 Al-Mg-Sc 合金的组织与性能[J]. 材料工程, 2020, 48(11): 124-130.
- [15] 陈显明, 潘清林, 范莹莹. Al-Mg-Sc-Ti 合金中 $\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{Ti}_{1-x})$ 粒子的析出行为[J]. 材料研究学报, 2020, 34(10): 737-743.
- [16] 刘健, 胡椿, 胡坤, 等. SiCp/Al-Mg-Sc-Zr 焊丝对 Al-Cu 合金焊缝组织性能的影响[J]. 金属材料与冶金工程, 2024, 52(2): 12-16.
- [17] Jiang Jingyu, Feng Jiang, Zhang Menghan. Microstructure evolution and mechanical properties of Al-Mg-Sc-Zr alloy sheet after friction stir welding[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(6): 1687-1700.
- [18] 肖罡, 李伟奇, 谢莉, 等. 激光熔化沉积 Al-Mg-Sc-Zr 合金单熔道成形质量预测[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(4): 1010-1020.
- [19] 赵宇辉, 贺晨, 赵吉宾, 等. 增材/等材复合制备 Sc/Zr 改性 Al-Mg 合金工艺研究[J]. 光学学报, 2023, 43(7): 163-170.