

激光选区熔化成形Al-Mg-Sc合金与O态5A06 板材TIG焊工艺研究

田志杰^{1, 2}, 马月婷¹, 王凯¹, 刘紫阳¹, 赵鑫¹, 张博禹¹

1. 首都航天机械有限公司 北京 100076

2. 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1.2mm厚激光选区熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 成形Al-Mg-Sc合金与O态5A06试板进行焊接, 对焊接接头的O态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熔化成形Al-Mg-Sc与O态5A06试板, 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0.2mm, 焊接接头SLM成形Al-Mg-Sc合金一侧熔合线附近的气孔夹渣数量和尺寸大小均大于母材及5A06试板一侧。焊缝中Sc和Zr微合金元素改善了组织晶粒大小, 为等轴晶; 熔池过冷区晶粒尺寸更加细密, 形成超细晶区, 晶粒平均大小以20 μm 为主。而熔池中其他区域, 焊缝区晶粒以40~50 μm 大小的等轴晶为主。焊缝断面气孔密集, 未发现明显的剪切唇, 存在明显韧窝组织, 部分韧窝内发现强化相颗粒, 呈现脆韧性复合断裂形貌。

关键词: Al-Mg-Sc合金; SLM; TIG; 微观组织; 晶粒

Process research for selective laser melting formed Al-Mg-Sc alloy and 5A06 alloy with O heat treatment sheet TIG welding

TIAN Zhijie^{1, 2}, MA Yueting¹, WANG Kai¹, LIU Ziyang¹, ZHAO Xin¹, ZHANG Boyu¹

1. Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076, China

2. State Key Laboratory of Welding and Joining, Beijing 100076, China

Abstract: A selective laser melting formed Al-Mg-Sc alloy sheet and 5A06 with O heat treatment sheet with the thickness of 1.2mm were welded by tungsten inert gas (TIG) welding with 5B71 filler wire. The microstructure evolution and refinement characteristics of the welded joints were investigated. The results showed that a large number of pores with the diameter of 0.2mm distributed near the front surface of the weld zone and the fusion line of the SLM Al-Mg-Sc and 5A06 with O heat treatment sheet weld sample with appropriate TIG welding parameters. The number and size of pores and inclusions near the fusion line of SLM side were larger than that of 5A06 side and base metals in the welded joint. The microstructure of weld zone was equiaxed grains, which was optimized by the micro-alloying elements of Sc and Zr. The subcooled zone of molten pool was ultrafine grain region composed of the average finer grain with a diameter of about 20 μm . Meanwhile, the other zones of molten pool mainly consisted of equiaxed grains with a diameter of 40~50 μm . It was found that some concentrated pores, no shear lip and some

第一作者: 田志杰, 研究员, 从事运载器研制、先进焊接及装配技术研究与应用等方面工作, E-mail: tzhj_2004@126.com。

dimples were present on the surface of fracture sample. Furthermore, some strengthening phases were observed in the dimples. It was indicated that the fracture mode was brittle-ductile mixed.

Keywords: Al-Mg-Sc alloy; SLM; TIG; microstructure; grain

1 序言

以粉末床为主要技术特征的激光选区熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 技术, 是目前应用较广泛的金属3D打印技术, 可以加工异形零件, 并被许多国家应用到航空、航天领域中。激光增材过程中容易产生夹渣、未熔合、气孔等缺陷^[1]。过烧组织、结晶偏析和元素蒸发损失将减弱沉淀强化效应, 降低产品质量。目前, 对SLM成形高强铝合金的性能评价研究, 主要集中在采取参数优化、程序改进等措施抑制裂纹产生及细化晶粒尺寸, 以提高合金力学性能, 而SLM成形件的焊接性^[2-5], 一直是科研工作者努力研究的方向, 马龙等^[2]发现SLM成形的AlSi₁₀Mg焊后断裂于热影响区和母材区交界处, 且沿此界面扩展, 并表现为韧窝+准解理形貌。刘奋成等^[3]对增材制造GH4169合金的电子束焊缝金属的塑性变形研究发现, 受焊缝各区域晶体取向影响, 它的变化与大角度晶界含量有关。

铝合金是航天型号产品常用的材料之一, Al-Mg-Sc合金可通过SLM快速制造形状复杂的结构件, 该结构件在应用前, 还要经过机械加工, 并与钣金件本体进行焊接。国内外学者对Al-Mg-Sc合金钣金件的焊接工艺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对铝基体晶粒组织演化影响进行了分析, 朱凯等^[6]指出氩弧焊焊接接头抗拉强度提高20%; 苏志强、XU等研究了VPPA及FSW焊接接头力学性能及断裂特征, 接头强度系数大于0.74^[7, 8]; TAEND等^[9]采用合理的焊接参数, 研究了搅拌摩擦焊接头组织与拉伸性能, 发现了焊核区1 μ m的晶粒及10nm的弥散相; ZHAO等^[10]分析比较了FSW与TIG焊的拉伸性能, 指出FSW的优势为焊缝比TIG焊缝屈服强度高。SLM成形铝合金的冶金缺陷不可忽视, 空洞、裂纹、飞溅及未熔合是常见的缺陷形式, 空洞主要与激光额定功率输入不匹配有关, 裂纹受材料本体特征和成形过程影响, 飞溅由熔池蒸汽反冲和气流夹带颗粒影响。采

用熔化焊工艺焊接SLM铝合金时, 使得焊缝中心形成铸造组织, 同时易将材料原始缺陷发展成气孔、热裂纹等新的焊接缺陷, 由此降低了焊缝性能^[11]。

本文采用手工TIG焊工艺, 对SLM成形Al-Mg-Sc合金试板与5A06板材进行焊接, 焊后通过光学显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM) 观察焊缝形貌, 为SLM成形的Al-Mg-Sc试板焊接性研究提供一定的试验数据。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

选用AlMgScZr合金粉末, 使用FS421金属打印机, 采用SLM方法打印Al-Mg-Sc合金试板, 功率400W, 激光光束直径为85 μ m, 扫描速率为1300mm/s。在打印前, 预先将其加热至80 $^{\circ}$ C, 以条状扫描策略制备, 为防止合金试板氧化, 使用99.999%高纯氩气进行气氛保护, 扫描间距为0.12mm, 单层粉末厚度40 μ m。分别打印横向和纵向试板, 并采用电火花线切割加工成尺寸为200mm $\times$ 100mm $\times$ 1.2mm的试板, 对打印后的试板进行280 $^{\circ}$ C $\times$ 2h退火处理, 5A06试板为退火热处理O态热轧板, 厚度规格为1.2mm, 采用剪板机切割成尺寸为200mm $\times$ 100mm $\times$ 1.2mm的试板。焊丝选用Al-Mg-Sc焊丝5B71, 该牌号焊丝属于铝镁系焊丝, 相比于5B06、5183等焊丝, 5B71焊丝添加了稀土元素Sc和Zr, 可以起到细化熔池晶粒, 提高材料焊接性的作用。保护气体采用符合GB/T 4842—2017《氩》标准的99.999%高纯氩。试板和焊丝的化学成分见表1。

2.2 焊接试验

焊前采用浓度为120~180g/L的NaOH试剂对试板表面进行清理, 然后用纯净水冲洗并烘干。将试板正反面焊接区域及端面, 采用钢丝刷进行打磨并用刮刀刮削去除表面氧化膜, 露出金属光泽, 用酒精擦拭清理洁净。采用手工TIG焊对试板进行焊接, 焊接方式为单面焊双面成形。手工TIG焊参数:

表1 SLM成形的A1-Mg-Sc合金、5A06试板和5B71焊丝的化学成分（质量分数）（%）

元素	Mg	Mn	Sc	Zr	Cu	Si	Fe	Zn	Al
A1-Mg-Sc合金	4.5	0.54	0.66	0.37	<0.05	—	—	<0.05	余量
5A06	5.8~6.8	0.5~0.8	—	—	0.1	0.4	0.4	0.2	余量
5B71	5.8~6.8	0.3	0.3~0.4	0.05~0.15	<0.05	—	—	<0.05	余量

焊接电流为40~50A，氩气流量为6~8L/min，焊接速度为100~150mm/min。

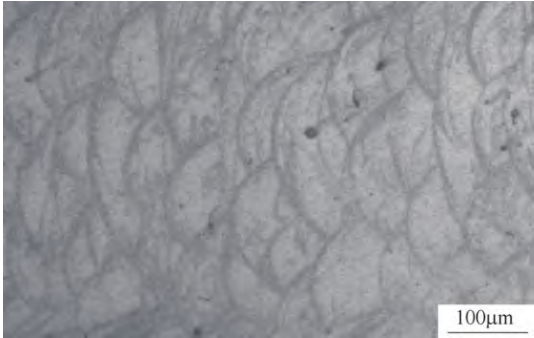
2.3 试验仪器

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相试样，对观察面进行抛光并化学浸蚀（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，采用扫描电子显微镜对断口进行分析。

3 试验结果与分析

3.1 母材截面

SLM成形的A1-Mg-Sc合金试板及5A06热轧试板母材横截面形貌如图1所示，A1-Mg-Sc合金试板层间界线清晰可见，错落分布的层间均匀有序，层间夹角较尖锐，层间界线热影响区位置的晶粒尺寸大于本体部分，层间界线处及本体内部存在夹渣、未熔合、气孔等缺陷，组织较疏松。这是由于SLM



a) SLM试板



b) 5A06试板

图1 SLM试板及5A06试板横截面形貌

成形过程中激光能量密度低，不能完全熔化金属粉末，层间难以紧密重熔，形成不规则的孔洞。激光二次扫描时，能量分布不均匀，部分粉末在未熔化的情况下，被包敷在熔池中，形成形状不规则的未熔合缺陷。焊接环境中湿度引起球形气孔，粉末气化也在熔池内部形成形状规则的金属蒸汽气泡，没有充足的时间逸出，形成气孔缺陷^[1]。

5A06试板横截面组织均匀紧密，晶粒纤细，晶粒形状沿轧制方向拉长，内部缺陷不明显，材料塑性较强。

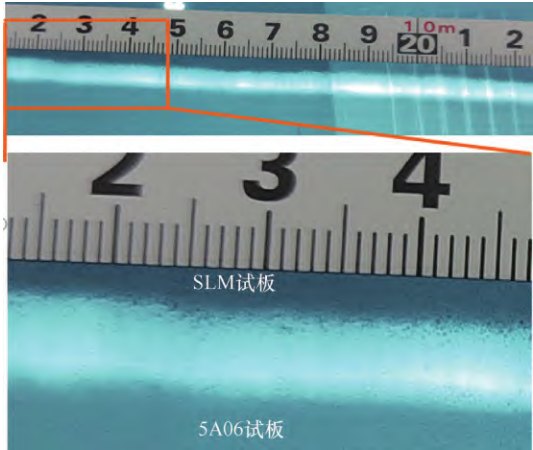
3.2 焊缝形貌

图2所示为TIG焊缝形貌及内部质量。由图2可以看出，焊缝正面宽度均匀一致，尺寸约6mm，氩气保护带宽度约12mm；从无损检测底片可以看出，焊接接头靠近SLM试板一侧熔合线位置，分布着数量较多的密集气孔，气孔带宽度约3mm；靠近5A06试板一侧位置，气孔数量明显降低。

图3所示为TIG焊缝横截面形貌。由图3可以看



a) 焊缝形貌



b) 内部质量

图2 TIG焊缝形貌及内部质量

出,焊缝正面余高约0.6mm,焊缝正面靠近SLM表面位置和焊接接头熔合线位置,分布着数量较多的气孔,越靠近表面位置,气孔直径有增大的趋势,最大直径达到0.3mm,焊接接头熔合线附近,目视可见的气孔夹渣数量也高于母材处;靠近5A06一侧位置,熔合线及热影响区区域分界线明显,气孔数量降低。焊缝内部位置缺陷是SLM疏松组织形成的焊接气孔夹渣游离在熔池中的产物。

焊缝区主要是由等轴晶组成的铸态组织,焊缝区内部晶粒组织相比于母材细长轧延纤维状晶粒,尺寸更加细小,但是焊缝区内部组织晶粒大小不一,虚线处晶粒尺寸明显小于其他地方,从虚线内超细晶分布情况看,基本沿着熔合线方向,且距离熔合线约1mm,另一部分超细晶区域分布在焊缝内部,超细晶区域多以细条状和小块状分布,由表及里遍布焊缝,每一条超细晶带的宽度尺寸约0.2mm。

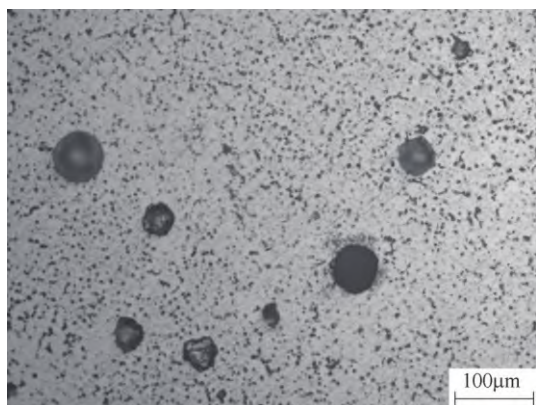


图3 TIG焊缝横截面形貌

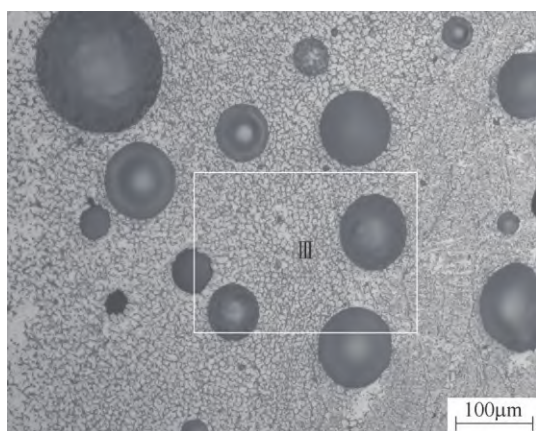
3.3 接头的微观组织

图4所示为焊接接头微观组织。焊缝内部表现为铸态组织,由等轴晶粒构成,尺寸均匀。由图4a可见,内部气孔尺寸约0.05mm;由图4b、c可见,内部气孔尺寸0.05~0.1mm,熔合线附近出现的未熔合、气孔、夹渣等缺陷。这些缺陷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,是在母材组织基础上气孔、夹渣、未熔合、氧化膜的聚集与发展。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,未及时逸出的气孔固封在焊缝表面,形成气孔,如图5a~d所示。熔合线附近的气孔由于其非完全液化状态,逸出难度加大,从而滞留在焊缝内部,形成大量内部气孔。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,如图5e所示。

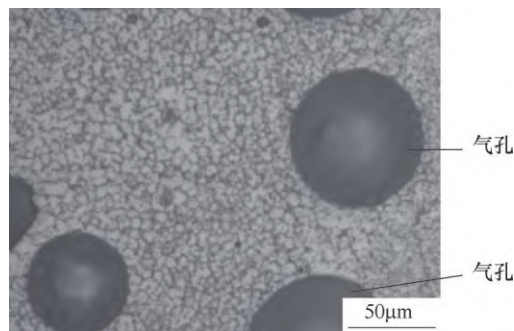
焊接熔池中的异质颗粒,将液体金属的原子在其基础上排列成晶体形态,形成异质晶核。非枝晶等轴区附在铝合金熔化边界狭小的焊缝区域。熔池



a) 图3中I处



b) 图3中II处



c) 图4b中III处

图4 接头微观组织

边界附近冷的液体不与热的熔池相混合,熔池边界原本作为弥散相存在于基体金属的 $Al_3(Sc, Zr)$ 颗粒,作为异质晶核保留下来形成细晶等轴区。 Sc 和 Zr 作为变质剂细化了铝合金焊接接头的晶粒。

较大的焊接速度,使焊缝金属的凝固速率也提高,薄板焊接熔池冷却速度更大,结晶速度也更快,前进中的固液界面前沿过冷,在焊接熔池中,这个足够长的充分过冷区域,造成晶粒大小的转变,熔池过冷区晶粒尺寸更加细密,形成超细晶区,晶粒大小以 $20\mu m$ 为主。而熔池中以缓冷方式结

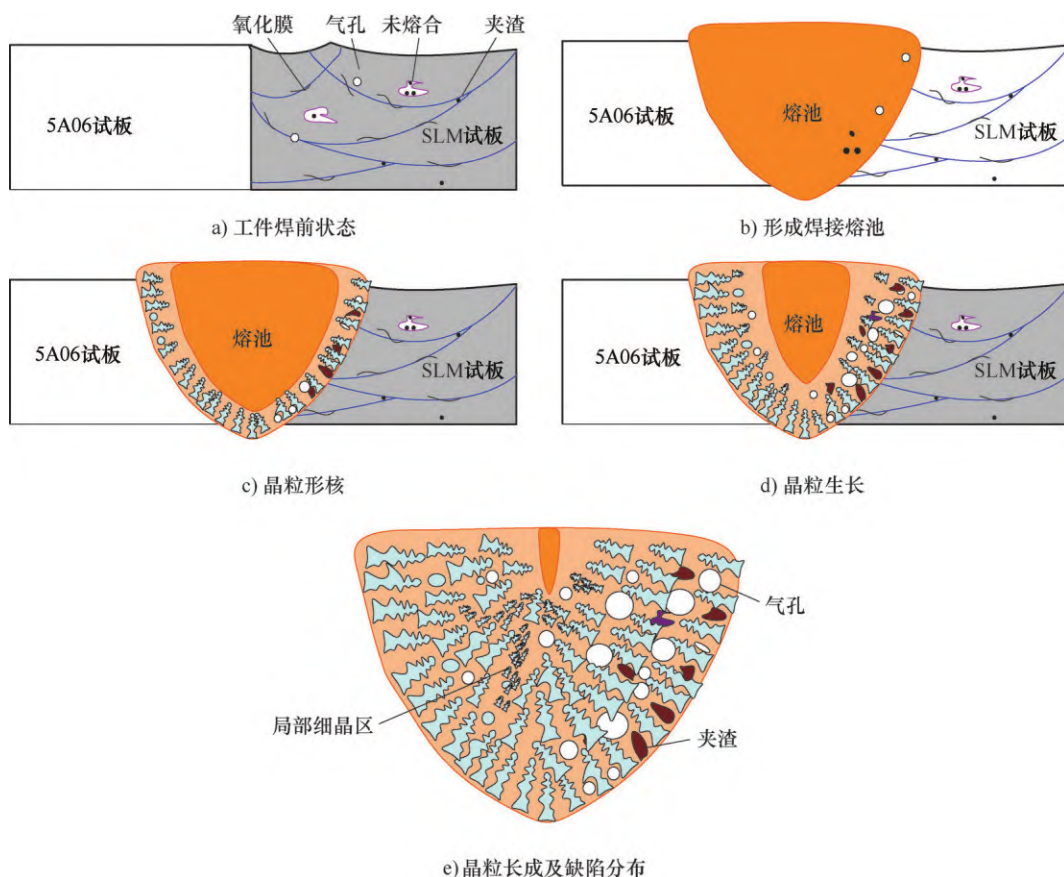


图5 焊缝缺陷产生机理

晶的区域，焊缝区晶粒以 $40 \sim 50 \mu\text{m}$ 大小的等轴晶为主，此区域以Sc和Zr元素的细化作用为主。相比于5A06铝合金焊缝组织，在稀土元素细化及冷却辅助共同作用下，薄板含钪铝合金焊缝组织形成尺寸大小变化较大的区域（见图3），对强度提升和增强抗裂能力有积极作用^[12-16]。

Sc和Zr微合金元素减小了组织晶粒尺寸，细化了晶粒大小。熔体中生成的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 颗粒既可以作为 $\alpha\text{-Al}$ 的晶粒细化剂、弥散颗粒起到抑制再结晶晶粒长大作用，也可以作为析出强化相共晶存在于基体^[15-20]。如图5e所示。

3.4 断口分析

采用扫描电镜（SEM）对断口进行分析。断口形貌如图6所示。由图6可知，断口呈现脆断形貌。断裂截面为垂直剪切断裂，从拉伸试样的宏观断口来看，断裂面气孔密集，金属光泽较弱，其上有细小的凹凸。由于试样较薄，断面未发现明显的剪切唇，存在明显韧窝组织，气孔密集，如图7所示；部分韧窝内发现强化相颗粒，可以确定其属于塑性韧

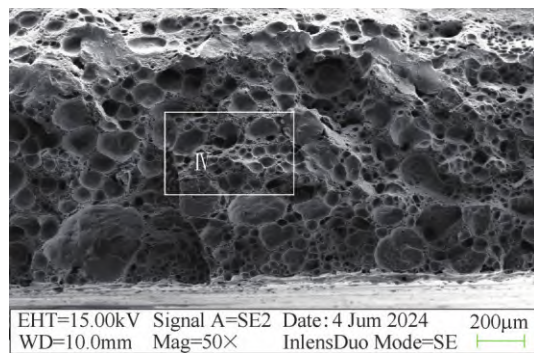


图6 焊缝接头断口宏观形貌

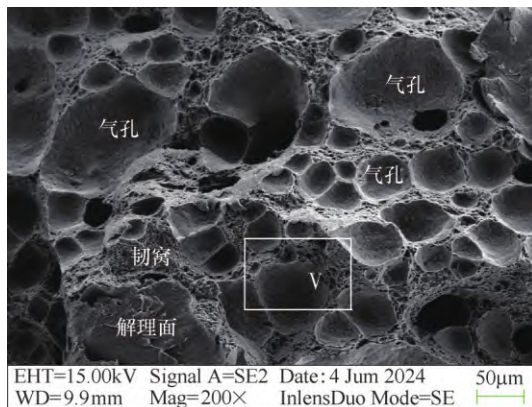


图7 图6中焊缝接头断口IV处宏观形貌

窝断裂,如图8所示。断口为脆韧性复合断裂。

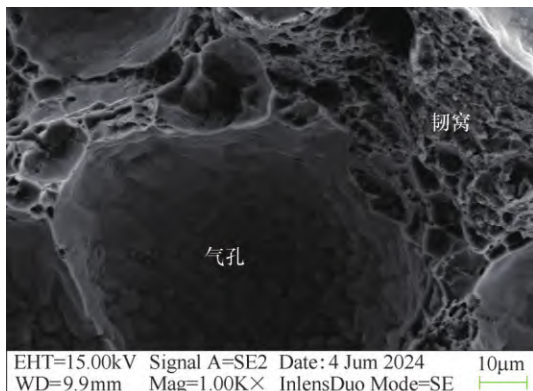


图8 图7中断口V处宏观形貌

4 结束语

1) 采用合理的TIG焊接参数焊接的SLM成形A1-Mg-Sc合金与5A06试板,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0.2mm,焊接接头SLM成形A1-Mg-Sc合金一侧熔合线附近的气孔夹渣数量和尺寸大小均大于母材及5A06试板一侧。

2) 焊缝中Sc和Zr微合金元素改善了组织晶粒大小,为等轴晶;熔池过冷区晶粒尺寸更加细密,形成超细晶区,晶粒大小以 $20\mu\text{m}$ 为主。而熔池中以缓冷方式结晶的区域,焊缝区晶粒以 $40\sim 50\mu\text{m}$ 大小的等轴晶为主。

3) 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,存在明显韧窝组织,部分韧窝内发现强化相颗粒。

参考文献:

- [1] 时云,王联凤,杜洋,等. A1Si10Mg铝合金选区激光熔化成形缺陷控制和表面质量优化[J]. 应用激光, 2023, 43 (3): 19-25.
- [2] 马龙,倪家强,张英伟,等. SLM增材制造的A1Si10Mg钨极氩弧焊工艺研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49 (3): 63-66.
- [3] 刘奋成,陈悦,徐洋,等. 不同取向激光增材制造GH4169合金电子束焊接接头组织和性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50 (4): 1283-1295.
- [4] 张康,史子木,王幸福. 铝合金点阵激光选区熔化成形及其准静态与动态压缩性能研究[J]. 金属加工(热加工), 2024 (8): 31-40.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] XU P, JIANG F, MENG S, 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.
- [9] TAENDL J, POLETTI C. 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 Bergund Hüttenmännische Monatshefte, 2016, 161 (7): 330-333.
- [10] ZHAO J, JIANG F, JIAN H G, 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.
- [11] 师静琳. 选区激光熔化成形高强铝合金及其强化机理研究[D]. 北京: 北京有色金属研究院, 2023.
- [12] XU P, JIANG F, TANG Z Q. Coarsening of Al_3Sc precipitates in Al-Mg-Sc alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 781: 209-215.
- [13] 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.
- [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] JIANG J Y, JIANG F, ZHANG M H. 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.

(下转第131页)

- 5183[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2021, 144 (7) : 071005.
- [18] SRIVASTAVA S, GARG K R, SACHDEVA A, et al. Distribution of residual stress in wire-arc additively manufactured small-scale component: Single-versus multi-level heat input[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2022, 145 (2) : 021008.
- [19] SAMES W J, LIST A F, PANNALA S, et al. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing[J]. International Materials Reviews, 2016, 61 (5) : 315-360.
- [20] XU M, ZHANG H, YUAN T, et al. Microstructural characteristics and cracking mechanism of Al-Cu alloys in wire arc additive manufacturing[J]. Materials Characterization, 2023, 197: 112677.
- [21] ARANA M, UKAR E, AGUILAR D, et al. Wire arc additive manufacturing of nanomodified 2024 alloy[J]. Materials Letters, 2023, 348: 134712.
- [22] KLEIN T, SCHNALL M, GOMES B, et al. Wire-arc additive manufacturing of a novel high-performance Al-Zn-Mg-Cu alloy: Processing, characterization and feasibility demonstration[J]. Additive Manufacturing, 2021, 34: 101663.
- [23] GU J, DING J, CONG B, et al. The influence of wire properties on the quality and performance of wire+arc additive manufactured aluminium parts[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1018: 210-214.
- [24] FU R, TANG S, LU J, et al. Hot-wire arc additive manufacturing of aluminum alloy with reduced porosity and high deposition rate[J]. Materials & Design, 2021, 199: 109370.
- [25] ZHANG C, GAO M, ZENG X. Workpiece vibration augmented wire arc additive manufacturing of high strength aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 271: 85-92.
- [26] GU J, DING J, WILLIAMS S W, et al. The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 230: 26-34.
- [27] HE F, YUAN L, MU H, et al. Research and application of artificial intelligence techniques for wire arc additive manufacturing: A state-of-the-art review[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2023, 82: 102525.
- [28] DAI P, LI A, ZHANG J, et al. Research status and development trend of wire arc additive manufacturing technology for aluminum alloys[J]. Coatings, 2024, 14 (9) : 1094.
- [29] 齐善根, 谭振, 李建一, 等. Al-Mg-Si合金电弧增材制造工艺参数与性能研究[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (12) : 25-31.
- [30] HAUSER T, REISCH R T, SEEBAUER S, et al. Multi-material wire arc additive manufacturing of low and high alloyed aluminium alloys with in-situ material analysis[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 69: 378-390.

(收稿日期: 20250122)

(上接第124页)

- [17] XU P, JIANG F, MENG S, 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.
- [18] VIGNESHWARAN S, SIVAPRASAD K, NARAYANASAMY R, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-3Mg-0.25Sc alloy sheets produced by cryorolling[J]. Materials Science & Engineering: A, 2019, 740-741: 49-62.
- [19] RAO M S, NALLU R H. Effect of scandium and zirconium additions on mechanical properties of Al-Mg-Mn alloy[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2019, 72 (1) : 227-238.
- [20] 刘小辉, 刘允中. 激光选区熔化成形高强铝合金晶粒细化抑制裂纹研究现状[J]. 材料工程, 2022, 50 (8) : 1-16.

(收稿日期: 20241128)