

铝合金电弧增材制造技术的研究现状及发展

骆凡尘¹, 张存祥², 王瑞权^{1, 3}

1. 浙江机电职业技术大学 浙江杭州 310053

2. 浙江建瓴机械科技有限公司 浙江杭州 310021

3. 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室 甘肃兰州 730050

摘要: 铝合金电弧增材制造技术 (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) 作为一种新型增材制造方法, 凭借其独特的材料沉积方式和高效制造能力, 近年来在轻质结构件的制造领域获得了广泛关注。该技术结合了电弧焊接与增材制造的优点, 具备高材料利用率和低生产成本等特点, 尤其适用于铝合金等轻质金属材料的快速制造。首先, 回顾了铝合金电弧增材制造的技术现状, 包括原理及工程应用实例; 其次, 分析了其面临的主要技术挑战, 包括残余应力与形变、裂纹与分层、孔隙率等问题; 最后, 探讨了铝合金电弧增材制造技术的发展趋势, 包括智能化与自动化、铝合金性能优化与多材料协同制造、与传统工艺结合等方面, 并展望了未来该技术在航空航天、车船制造等领域的应用潜力及发展方向。

关键词: 铝合金; 电弧增材制造; 智能制造

Review on aluminum alloy wire arc additive manufacturing technology

LUO Fanchen¹, ZHANG Cunxiang², WANG Ruiquan^{1, 3}

1. Zhejiang Polytechnic University of Mechanical and Electrical Engineering, Hangzhou 310053, Zhejiang, China

2. Zhejiang Jianling Machinery Technology Co., Ltd., Hangzhou 310021, Zhejiang, China

3. Lanzhou University of Technology State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou 730050, Gansu, China

Abstract: As one of the new types of additive manufacturing methods, wire arc additive manufacturing (WAAM) has gained widespread attention in manufacturing lightweight structural components in recent years due to its unique material deposition method and efficient manufacturing capabilities. This technology combines the advantages of arc welding and additive manufacturing. Its high material utilization and low production costs are especially suitable for the rapid manufacturing of lightweight metal materials such as aluminum alloys. This article first reviews the current status of wire arc additive manufacturing technology for aluminum alloys, including principles and engineering application. Then, the main technical challenges it faces were analyzed, including residual stress and deformation, cracking and delamination, and porosity. Subsequently, wire arc additive manufacturing technology development trends for aluminum alloys were discussed, including intelligence and automation, aluminum alloy performance optimization and multi-material collaborative manufacturing, and integration with traditional processes. Finally, this

基金项目: 浙江省教育厅科技项目 (FG2024037); 浙江机电职业技术大学产教融合重点科研项目 (A-0271-24-208)。

第一作者: 骆凡尘, 助理实验师, 硕士研究生, 主要研究方向为金属材料工程, E-mail: lauraluo0324@163.com。

通信作者: 王瑞权, 教授, 博士研究生, 主要研究方向为金属材料成形及控制, E-mail: wrq7@163.com。

technology's potential applications and development directions in aerospace, vehicle and vessel manufacturing, and other fields were also discussed.

Keywords: aluminium alloy; wire arc additive manufacturing; intelligent manufacturing

1 序言

增材制造 (Additive Manufacturing, AM) 技术, 也被称为3D打印技术, 是一种通过逐层添加材料制造零件的技术, 相对于切削加工、铸造等传统减材制造技术, 增材制造技术可以在复杂几何形状的构建中提供更大的自由度^[1]。近年来, 增材制造技术在航空航天、汽车、船舶、医疗卫生、建筑等行业中得到了广泛的应用, 成为现代制造业的重要发展方向之一。

作为一种低密度、高比强度、耐腐蚀性能好、加工性能优、绿色环保的材料, 铝合金广泛应用于航空航天、汽车和电子领域^[2]。然而, 传统的铝合金制造工艺常常面临着材料浪费、生产周期长、成本较高等问题。同时, 随着现代制造业的快速发展, 传统加工方式, 如铸造、机械加工、锻造等工艺, 难以满足高强度、高复杂度、高精度的铝合金结构件加工需求^[3]。为此, 基于铝合金的增材制造技术提供了一种更优的解决方案。

当前常用的铝合金增材制造手段有粉末床熔融 (Powder Bed Fusion, PBF) 和电弧增材制造 (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM)。PBF技术通过利用热能将粉末材料粘合在一起合成固体形状, 根据热源的不同, 又分为激光选区熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 和电子束选区熔化 (Electron Beam Selective Melting, EBSM)^[4]。由于铝合金易氧化、粉末材料制作成本高等特点, 使用PBF技术对铝合金进行增材制造的研究受到较大限制。SLM工艺利用激光将粉末材料熔化后层层叠加, 已在钛合金、镍基合金、合金钢等材料领域有着广泛应用, 但针对铝合金, 因其较高的热导率、反射率和较低的激光吸收率 (16.7%), 极易造成激光能量消耗, 粉末不能完全熔化、产生大的热应力、内部孔隙率、热裂纹等缺陷, 适用范围十分受限, 目前仅AlSi10Mg合金在SLM技术中应用较多^[5, 6]。EBSM技术电子束将粉末材料熔化成形, 具有高密度、高致密、低反射、高效率等特点。

但由于电子束加速电压固定, 工艺参数难以调整, 低熔点元素在加热过程中极易蒸发烧蚀, 成形时微观组织和性能各向异性等问题, 虽然在合金钢、钛合金、高熵合金等材料上有较多应用, 但针对铝合金、镁合金等易挥发元素, 应用较少^[7]。而WAAM技术由于设备成本低、丝材制造简单、对工作环境要求不高等优势, 在铝合金增材制造中展示出独特的优势^[4]。

电弧增材制造技术是基于传统电弧焊接工艺, 以金属丝材为原料, 以电弧为热源, 在电弧的高温作用下熔化丝材, 并通过热沉积的方式, 将铝合金按照预先设定的轨迹逐层堆积形成所需的三维构建的增材制造工艺 (见图1)^[8]。与其他增材制造技术相比, 电弧增材制造技术设备简单、成本低、材料利用率和沉积率高, 可应用于复杂几何结构件的快速成形^[9]。通过精确控制电弧的热输入、沉积路径及工艺参数, 能够实现铝合金的高效成形^[10]。但是, 采用电弧增材制造技术成形的铝合金结构件也存在熔池较大、精度较低等问题, 亟待对铝合金电弧增材制造进行过程控制优化。

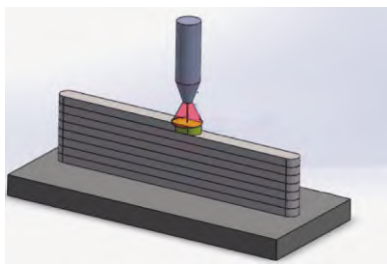


图1 电弧增材制造加工过程^[8]

本文探讨铝合金电弧增材制造技术的发展现状、存在的缺陷、发展趋势, 以期为该技术改进与应用提供参考。

2 铝合金电弧增材制造技术发展现状

2.1 铝合金电弧增材制造技术的主要类型

目前, 基于铝合金的电弧增材制造技术主要分为钨极气体保护焊 (GTAW)、熔化极气体保护焊 (GMAW)、等离子弧焊 (PAW) 和冷金属过渡

焊（CMT）等^[11]，各工艺主要特征及比较见表1。设备主要包括焊接机器人、电弧电源、熔池监测系统、气体保护装置等（见图2）^[12]。相较传统增材制造设备，电弧增材制造设备需要较强的动态控制能力，从而实现调节电弧的稳定性、沉积路径和焊接速度。

表1 WAAM加工工艺比较^[11]

工艺名称	钨极气体保护焊	熔化极气体保护焊	等离子弧焊 (PAW)	冷金属过渡焊 (CMT)
沉积速率 / (kg/h)	1~2	3~4	2~4	2~3
热源	GTAW	GMAW	等离子	GMAW
电极	不消耗电极，需单独送丝机构	消耗电极	不消耗电极，需单独送丝机构	往复式自耗电极
主要特征	旁轴送丝	电弧稳定性差，有飞溅	旁轴送丝	消耗电极；低热量输入，无飞溅，高工艺容差

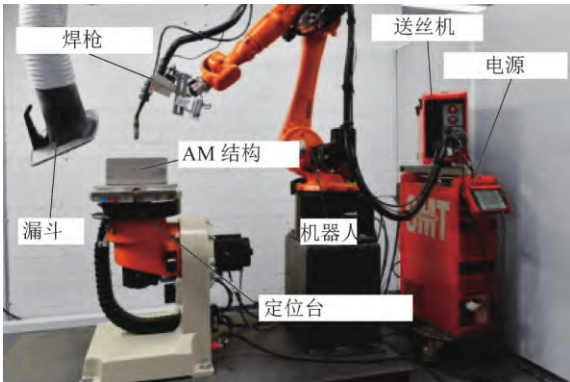


图2 机器人电弧增材制造工作站^[12]

2.2 铝合金电弧增材制造的工程应用

目前，铝合金电弧增材制造技术尤其适用于制造航空航天和车船制造行业中复杂结构件和轻质、高强度大尺寸零件制造，可以在不影响安全性的情况下将重量减轻50%^[13]。铝合金良好的导电性和导热性使得其在电弧增材制造过程中能够快速散热，减少热应力和形变，提高成形质量。

在航空航天领域，Harlow-FasTech公司利用电弧增材制造工艺加工铝合金叶轮轴，制造成本可降低30%。WILLIAMS等^[14]利用制造技术和Ti-6Al-4V铝合金生产了1.2m长的飞机翼梁，包含了T形接头、交叉口等复杂结构。使用相同材料生产了重24kg的飞机外部起落架组件（见图3），与传统制造工艺相比，节省了超过220kg的铝合金原材料。LORKET公司使用2219铝合金打印了尺寸

为1535mm×530mm×75mm的飞机舱壁，耗时仅12.5h，比传统工艺减少84.6%的材料使用量。西安交通大学卢秉恒院士团队利用电弧增材一体化制造技术，生产了世界上首件 ϕ 10m级高强铝合金重型运载火箭连接环样件（见图4）。连接环重约1t，成本比传统加工工艺大幅降低，生产周期缩短至1个月^[15]。首都航天机械有限公司开发的铝合金电弧增材制造技术被用于捷龙三号火箭的2个卫星支架和1件过渡产品的生产，其中卫星支架重120kg，直径达1.4m，高度近1m，产品毛坯成形周期仅为15天，比传统铸造工艺周期缩短50%以上。2023年3月，Relativity Space公司发射升空了世界上首例3D打印火箭Terran 1，其末端执行器也采用了电弧增材制造工艺打印的铝合金初级和次级结构。其使用的Stargate系统可打印直径3.4m、高7.6m的结构，是目前世界上最大的金属3D打印系统（见图5）。

在汽车、船舶制造领域，英格尼玛公司成功使用ER5356铝合金焊丝进行电弧3D打印制造了汽车底盘，实现大尺寸零部件的精细化打印，可以满足汽车零部件的尺寸精度和质量要求，展现了该技术在汽车制造领域的应用潜力。川崎重工BW Epic Kosan船舶Epic Salina上安装了由Pelagus3D公司打印的镍铝青铜合金（NAB）螺旋桨叶片（见图6），与传统工艺相比，其强度提高了40%，从设计到安装仅花费6周时间。AML3D公司同样使用NAB合金为美军潜

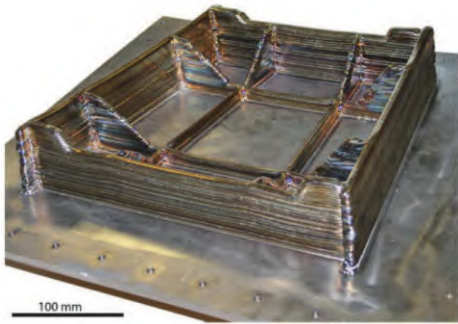


图3 24kg Ti-6Al-4V铝合金飞机外部起落架^[14]

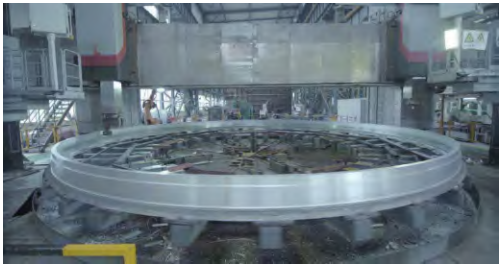


图4 ϕ 10m级高强铝合金重型运载火箭连接环样件^[15]



图5 Stargate金属3D打印系统



图6 镍铝青铜合金螺旋桨叶片

艇打印重达1t的非安全关键组件。

3 铝合金电弧增材制造存在的缺陷及改善方法

尽管铝合金电弧增材制造在工业生产中已经有所应用，但铝合金电弧增材制品也常存在各种冶金缺陷，如断裂、分层、气孔、变形、残余应力及氧化等，进而影响铝合金电弧增材制品的力学性能。

3.1 残余应力与变形

由于焊接过程中的高热量输入，铝合金电弧增材制造部件在反复熔化和冷却过程中的热梯度较大，在反复的热膨胀和收缩下，会导致铝合金部件产生残余应力，发生形变，精度产生误差，使铝合金产生弯曲、变形，影响部件的寿命和疲劳强度^[11, 16]。KÖHLER等^[12]研究表明，铝合金电弧增材的残余应力与材料的屈服强度有关。屈服强度较低的4047铝合金的残余应力（ $-66 \pm 34 \text{ MPa} \sim -95 \pm 15 \text{ MPa}$ ）明显小于5356铝合金的残余应力（ $-150 \pm 60 \text{ MPa} \sim -156 \pm 44 \text{ MPa}$ ）。通过控制层间温度可以有效减少残余应力的产生。DEREKAR等^[17]研究发现，使用较低的层间温度（ 50°C ）沉积5183铝合金，其残余应力比使用较高的层间温度（ 100°C ）沉积的样品高约20%。SRIVASTAVA等^[18]提出了可以通过多级热输入的方式减少小尺寸铝合金电弧增材制造产品的纵向残余应力。相比于单热输入方式的残余应力（ 368.75 MPa ），四级热输入纵向残余应力（ 343.92 MPa ）减少了6.73%。

3.2 断裂和分层

断裂和分层主要是由铝合金的热性能和材料特

性引起的。分层是由于电弧增材制造过程中，新层沉积时的不完全或部分熔化造成的，是一种无法通过后处理进行消除的缺陷^[19]。断裂则是由于铝合金的低熔点和较高的热膨胀系数，在大厚度沉积时，由于热输入的不均匀性和冷却速度较快的原因，容易形成粗晶粒和高热应力，从而产生热裂纹^[20]。针对热裂纹，进行本征热处理或添加纳米材料改性均可以有效细化晶粒，减少裂纹产生。ARANA等^[21]通过向2024铝合金中添加TiC纳米颗粒，使铝合金在电弧增材制造过程中无裂纹产生，产生精细的等轴晶粒结构（见图7）。KLEIN等^[22]对ML7075铝合金进行本征热处理，有效减少了Al-Zn-Mg-Cu合金在电弧增材中产生的裂纹。

3.3 表面质量与孔隙率

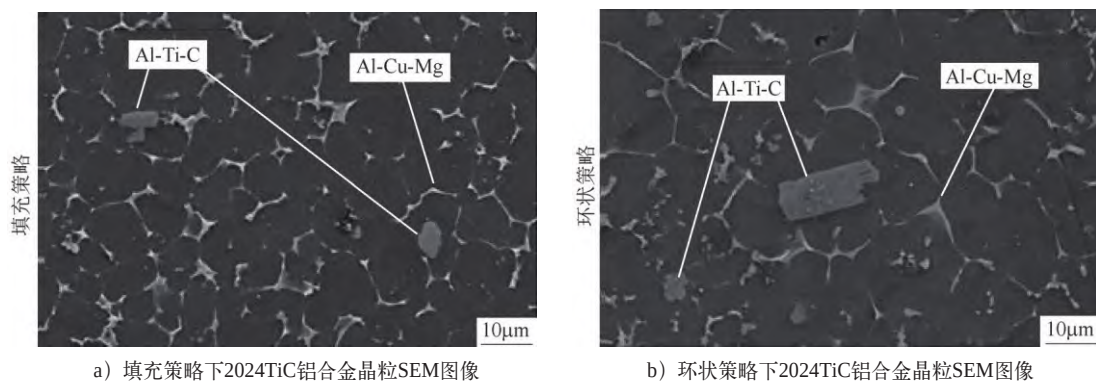
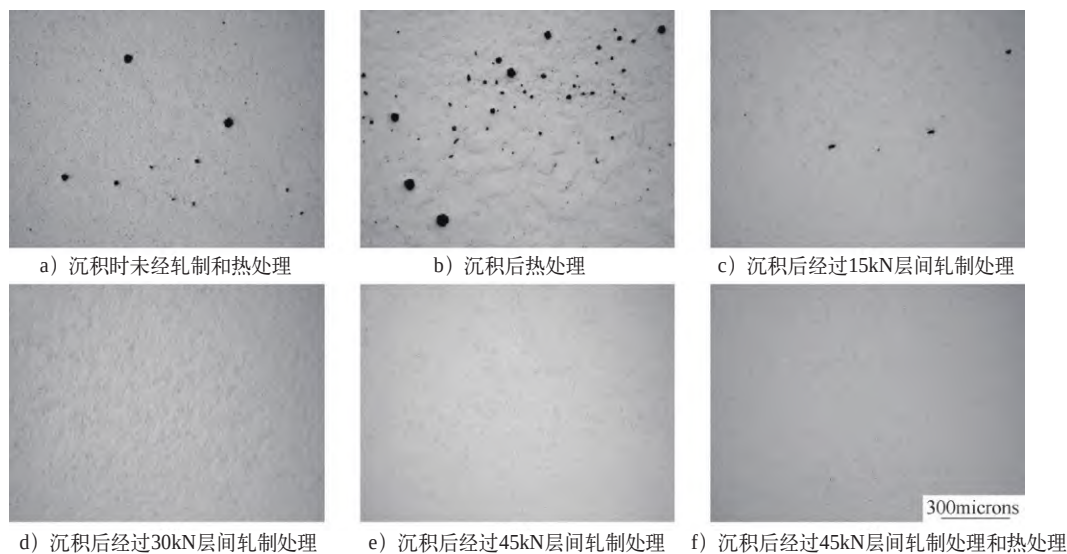
由于熔池的高温 and 动态变化，铝合金在电弧增材制造中易产生表面不均匀、烧伤、波纹等表面缺陷，影响零件的外观质量和精度。然而，表面平整光洁的铝合金丝材孔隙率和性能明显优于有划痕、加工残留物和氧化物的丝材^[23]。高温会诱导铝合金丝材表面的水分、油脂和其他氢污染物产生氢离子。在凝固过程中，由于铝合金固态和液态氢溶解度的巨大差异，氢离子浓度大于固态铝合金氢溶解度，进而形成孔隙^[24]。通过层间机械加工、提高铝合金丝材表面质量、工件振动等方式可以有效控制铝合金工件的孔隙率。例如，ZHANG等^[25]通过在电弧增材制造过程中进行工件振动来细化Al-Mg合金晶粒，孔隙率最高可减少22%。GU等^[26]在2319和5087铝合金沉积过程中，在每个沉积层间采用层间轧制工艺，轧制后经热处理的两种合金孔隙尺寸和孔隙率均有明显减少（见图8）。

4 铝合金电弧增材制造技术的发展趋势

4.1 智能化与自动化发展

随着人工智能、传感技术和控制技术的发展和人工智能技术越来越多的被用于制造生产中。作为工业4.0中最为突出的主流制造系统之一，传统的增材制造技术也在不断升级，成为融合传感器和新型人工智能算法的智能制造系统。

当前的人工智能技术包括机器学习、自动化和机器人技术、机器视觉、数据挖掘、大数据和专家系统等。目前，机器人技术已在铝合金电弧增材制造系统中广泛应用，而其他人工智能技术则有希望

图7 不同经历调控手段下2024TiC铝合金增材制造等轴晶粒SEM图像^[21]图8 经过不同层间轧制和热处理的2319铝合金空隙尺寸变化^[26]

成为解决铝合金电弧增材技术问题的关键之一^[27]。例如，利用机器学习系统和大数据辅助，建立数据模型，可以根据零部件的几何形状、使用场景和性能需求等，自动生成最佳工艺参数组合和最优焊接路径，实现制造工艺的预设计。在增材制造过程中引入机器视觉系统，对熔池的温度、铝合金的沉积速度、电弧的稳定性等进行实时监控，有望实现铝合金沉积自适应过程控制。此外，数据挖掘系统和机器学习进一步辅助制造工艺，进行缺陷检测和产品分析，实现对工艺参数实时优化，提高生产效率和产品稳定性。

4.2 优化合金材料和多材料协同制造

增材制造工艺巨大的经济效益和环保优势让产品设计走向多元化，以期用最轻的重量最大限度地实现产品的功能性。例如，具有高强度的6系和7系铝合金对航空航天领域一直是吸引力的材料，但由于其专用丝材的制造和加工困难，在电弧增材制造领域鲜有报道^[28, 29]。未来的铝合金电弧增材技术

将致力于开发更高性能的铝合金材料。通过深入研究铝合金元素的作用机制、精准调控合金成分、对丝材进行表面改性、优化热处理工艺曲线等方式，获得强度更高、韧性更优、腐蚀性更强、焊接性和成形性更优的铝合金材料，降低对制造工艺的敏感性，以满足航空航天、汽车、船舶制造等高端领域对材料性能日益严苛的要求。通过将不同性能的铝合金进行协同制造，或与其他合金材料或陶瓷材料结合使用等方法进行多材料协同制造，开发多弧协同增材制造工艺，进而提高能源利用率，满足高性能零部件的生产需求，或将是实现上述目标的一个关键突破^[30]。

4.3 增材制造与传统制造相结合

尽管电弧增材制造技术越来越多地应用于大型和复杂几何形状组件的工业生产中，但现阶段其成形精度仍无法完全满足部分高端领域重要结构件的制造精度需求。因此，将电弧增材制造技术与传统制造方法（如CNC加工、铸造等）相结合将成为铝

合金电弧增材制造技术未来的发展关键。混合制造技术能够综合考虑材料特性和加工要求,拓宽材料的选择范围,实现多种材料的有效结合。例如,可以在电弧增材制造工艺后对工件进行CNC加工,通过混合制造技术的实施,能够在快速成形复杂形状的同时,对工件进行精细处理,修正尺寸偏差,提高表面质量,提升零件精度和质量。也可以利用增材制造技术快速搭建大型部件的基本结构,再使用传统制造工艺针对性完成后续加工,采用并行或连续作业,避免单一工序的冗长流程,从而降低成本,缩短加工周期。

5 结束语

铝合金电弧增材制造技术凭借其在轻质金属零部件制造方面的显著优势,在航空航天、汽车等高端制造领域展现出了广阔的应用前景。未来的研究将聚焦于铝合金电弧增材制造工艺的优化、缺陷控制、新材料的开发、智能传感和过程控制、数据分析、机器学习等方面,解决现有技术中的缺陷。铝合金电弧增材制造技术作为智能制造和绿色制造的重要一环,将为高端制造业的蓬勃发展提供坚实的支撑,实现更为高效、精确的零部件制造,助力行业迈向新的高度。

参考文献:

- [1] 李子淇, 常子金, 姜自昊, 等. TIG电弧增材制造AZ31镁合金成形尺寸控制研究[J]. 金属加工(热加工), 2024(7): 6-12.
- [2] 白志玲. 铝合金的研究现状及应用[J]. 科技广场, 2015(12): 18-20.
- [3] 王磊, 葛佳惺, 王韬磊, 等. 增材制造金属材料的焊接性能研究进展[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版), 2024, 37(4): 10-16.
- [4] 铂金, 蔡琳薇. 铝合金电弧增材制造调控手段的研究现状[J/OL]. 焊接学报: 1-13. [2024-12-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1178.TG.20241210.1133.002.html>.
- [5] 马成燕, 陶双洋, 韩璐, 等. 激光粉末床熔融技术成形铝合金缺陷研究[J]. 材料科学, 2022, 12(8): 807-814.
- [6] 刘书俊, 肖文龙, 杨昌一, 等. 激光粉末床熔融增材制造耐热铝合金的研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(18): 175-183.
- [7] 严侃, 高志杰, 高磊, 等. 电子束选区熔化增材制造金属材料研究进展[J]. 热加工工艺, 2024, 53(11): 7-13.
- [8] SHAH A, ALIYEV R, ZEIDLER H, et al. A review of the recent developments and challenges in wire arc additive manufacturing (WAAM) process[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2023, 7(3): 97.
- [9] 余圣甫, 禹润缜, 何天英, 等. 电弧增材制造技术及其应用的研究进展[J]. 中国材料进展, 2021, 40(3): 198-209.
- [10] 邹文凤, 戴开明, 曲飞飞. 铝合金增材制造工艺研究现状[J]. 精密成形工程, 2024, 16(9): 143-152.
- [11] SARIKAYA M, BA CIL ÖNLER D, DA LI S, et al. A review on aluminum alloys produced by wire arc additive manufacturing (WAAM): Applications, benefits, challenges and future trends[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 5643-5670.
- [12] KÖHLER M, FIEBIG S, HENSEL J, et al. Wire and arc additive manufacturing of aluminum components[J]. Metals, 2019(9): 608.
- [13] HIRSCH J. Recent development in aluminium for automotive applications[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(7): 1995-2002.
- [14] WILLIAMS S W, MARTINA F, ADDISON C A, et al. Wire + arc additive manufacturing[J]. Materials Science and Technology, 2016, 32(7): 641-647.
- [15] 铝加工. 我国10m级高强铝合金重型运载火箭连接环样件实现一体化打印[J]. 铝加工, 2021(1): 35.
- [16] OMIYALE B O, OLUGBADE O T, ABIOYE E T, et al. Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys for aerospace and automotive applications: A Review[J]. Materials Science and Technology, 2022, 38(7): 391-408.
- [17] DEREKAR S K, AHMAD B, ZHANG X, et al. Effects of process variants on residual stresses in wire arc additive manufacturing of aluminum alloy

- 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)