

CMT电弧增材制造AZ31镁合金组织及性能研究

王俊¹, 尤启凡¹, 王宏², 徐方晖¹, 刘奋成¹

1. 南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室 江西南昌 330063

2. 南昌航空大学工程训练中心 江西南昌 330063

摘要: AZ31镁合金具有比强度高、导电导热性能好等特点,在交通运输、电子工业、航空航天等领域应用广泛。采用冷金属过渡(CMT)技术制备了具有细等轴晶粒的AZ31镁合金薄壁构件。研究了电弧摆动对电弧增材制造AZ31镁合金显微组织和力学性能的影响。结果表明:电弧摆动可有效细化AZ31镁合金晶粒,无摆动、电弧摆动试样的平均晶粒大小分别为46.9 μm 、36.7 μm 。电弧摆动下横向拉伸试样和纵向拉伸试样极限抗拉强度分别达到216MPa和221MPa,明显优于无电弧摆动制备的试样。

关键词: 电弧增材制造; AZ31镁合金; 显微组织; 力学性能

Microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy by CMT wire arc additive manufacturing

WANG Jun¹, YOU Qifan¹, WANG Hong², XÜ Fanghui¹, LIU Fencheng¹

1. National Defence Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China

2. Engineering Training Center, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China

Abstract: AZ31 alloy has the characteristics of high specific strength, good electrical and thermal conductivity, and is widely used in transportation, electronics industry, aerospace and other fields. AZ31 magnesium alloy thin-walled components with fine equiaxed grains were successfully prepared by cold metal transfer (CMT). The effects of spiral oscillation on the microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy fabricated by arc additive manufacturing were studied. The results show that the arc oscillation can effectively refine the grain size of AZ31 alloy. The average grain size of the samples without swing and arc swing is 46.9 μm and 36.7 μm . The ultimate tensile strength of the transverse tensile sample and the longitudinal tensile sample under arc oscillation reaches 216MPa and 221MPa, respectively, which is significantly better than that of the sample prepared without arc oscillation.

Keywords: wire arc additive manufacturing; AZ31 magnesium alloy; microstructure; mechanical property

基金项目: 国家自然科学基金(52361010); 江西省重大科技专项(20214ABC28W001); 航空科学基金(2023Z049056001)。

第一作者: 王俊, 硕士研究生, 主要研究方向为金属增材制造, E-mail: 18146625050@163.com。

通信作者: 尤启凡, 博士, 主要研究方向为金属增材制造, E-mail: qfyou1071@163.com。

1 序言

镁合金是实际工程应用中的常见轻质金属材料之一，因其具有比强度和刚度高、阻尼性好、铸造性能好等特点，在汽车、航空航天、兵器及电子等领域引起了极大的关注^[1-3]。然而，由于镁合金的加工性较差，一些复杂的结构件很难用常规的制造方法成形出来。增材制造技术具有无模具、自由成形、表面质量好等诸多优点，为复杂结构部件的制备提供了一种行之有效的加工方式^[4-6]。

电弧增材制造 (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) 是一种先进的数字化制造技术，以焊接电弧为热源，通过送丝机构和多轴运动系统，将丝材熔化，并在程序控制下过渡到熔池中，最终完成零件成形^[7]。该路线由“自下而上”和“逐层”制造。由于WAAM具有经济成本低、工艺简单、线材回收率高及制造周期短等优点，因此逐渐成为制造业领域科研人员的研究重点，特别是镁合金零部件的制造^[8-10]。冷金属过渡 (Cold Metal Transfer, CMT) 是电弧增材技术的一种，将熔滴过渡与焊丝回抽相结合，可以减少焊接热输入和变形，提高熔覆效率^[11, 12]。此外，CMT可用于制造铜合金、铝合金、镁合金等许多表面反射严重的材料，并且能够制备大型零部件，相比于激光增材制造技术具有一定优势^[13, 14]。CMT技术具有极其稳定的电弧，以及低热输入、无飞溅等特点，基于此，诸多学者将其应用到镁合金的成形中^[14]。WANG等^[15]通过调整CMT工艺参数制备AZ31镁合金薄壁构件，对其加工工艺、显微组织和力学性能进行了研究，发现选取能量输入工艺中强脉冲的CMT特性是AZ31镁合金合适的工艺参数，其焊缝润湿性好，等效热输入低。虽然相比于锻态和铸态的AZ31镁合金有良好的力学性能，但是其明显的层带组织会导致各向异性的产生。YANG等^[16]进一步研究了CMT增材制造AZ31镁合金薄壁构件的显微组织和拉伸性能，并详细讨论了其组织演变及其对力学性能的影响。然而，粗大的柱状晶组织及各向异性仍然存在CMT制备的AZ31镁合金中。电弧摆动是指在焊接过程中，电弧沿焊接方向移动，并沿焊缝拓宽方向周期性摆动。增材制造中的电弧摆动通常基于焊接平面，并以一定的频率沿着焊接路径的长度和宽度移动。在焊接过程中，熔融区中的晶粒结构可以通

过摆动电弧来控制^[17]。例如，YUAN等^[18]发现，电弧摆动使AZ31和AZ91镁合金的焊缝晶粒得到了显著细化。WEI等^[19]也利用电弧摆动模式对2319铝合金进行成形，以改善焊缝形貌并促进等轴晶粒的形成。诸多研究表明^[20, 21]，电弧摆动可以加快冷却速度，改善结晶过程中的欠冷问题，最终细化晶粒并提高其性能。但是，目前关于电弧摆动策略对CMT增材制造镁合金的影响鲜有研究报道。

基于此，为改善CMT增材制造AZ31镁合金的力学性能，本文研究电弧摆动CMT沉积AZ31镁合金薄壁构件的显微组织和力学性能，讨论电弧摆动对其组织结构及其力学性能的影响，旨在为CMT增材制造镁合金构件提供可靠的思路见解。

2 试验材料与方法

试验采用直径为1.2mm的AZ31镁合金焊丝，其化学成分见表1，采用WAAM-CMT系统成形AZ31镁合金薄壁构件。所用的WAAM-CMT系统由六轴机器人KUKA KR30HA、福尼斯TransPlus Synerguc 5000及配套的送丝机构VR7000-CMT组成。AZ31镁合金薄壁构件CMT-WAAM系统及成形过程如图1所示。在尺寸为200mm×50mm×10mm的AZ31镁合金轧制板材基材上进行逐层沉积，使用99.99%的氩气作为保护气体。根据前期预试验结果，CMT成形试验参数为：焊接电流91A、送丝速度5.4m/min、沉积速度3.2m/min、焊丝干伸长12mm、保护气体流量15L/min。在成形过程中采用往复式策略，焊枪的行走长度为120mm，沉积层数为30层，层间等待时间为80s。如图2所示，采用螺旋形摆动方式成形薄壁构件，设定摆动宽度为2.2mm、摆动幅度1.1mm。进行成形试验前，先用砂纸去除基材表面氧化膜，并用丙酮、酒精清洗去除有机物，用真空加热炉对基材和焊丝进行除湿处理，加热时间为120min，保温温度为120℃，保温时间为120min，然后随炉冷却至室温。

表1 AZ31镁合金焊丝化学成分 (质量分数) (%)

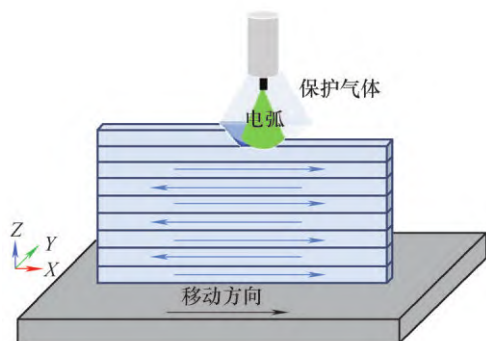
Al	Zn	Mn	Si	Mg
2.54	0.67	0.44	0.027	余量

为了进行显微组织分析，分别从AZ31镁合金薄壁构件的上、中、下三个区域进行线切割，将线切割截面 (YOZ面) 样品抛光，并使用4.2g苦味酸

+10mL乙酸+10mL蒸馏水+80mL无水乙醇的腐蚀液进行腐蚀,持续时间为10s。采用MR5000型倒置显微镜对样品的显微组织进行观察。使用WT-401MVD型数显显微硬度计对不同电弧摆动情况下CMT电弧熔丝增材制造AZ31镁合金薄壁构件进行硬度测定。试验载荷为100g (0.98N),保持时间10s,试验位置选择在沉积方向的垂直线(Z)上间隔3mm。采用数据点拟合的方法获得显微硬度的变化趋势,从而分析显微组织对显微硬度变化的影响。为研究显微组织对拉伸性能的影响,取AZ31薄壁构件试样进行了横向(X)和纵向(Z)的室温拉伸试验。拉伸试验在W9W-30型电子万能试验机上



a) WAAM-CMT系统



b) 成形过程示意

图1 AZ31镁合金薄壁构件CMT-WAAM系统及成形过程

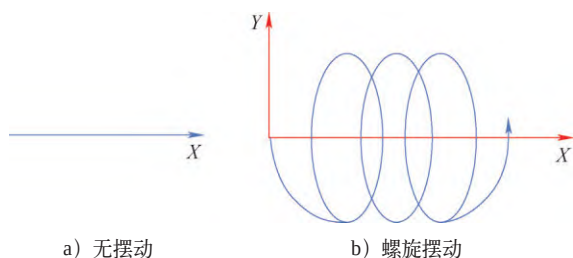
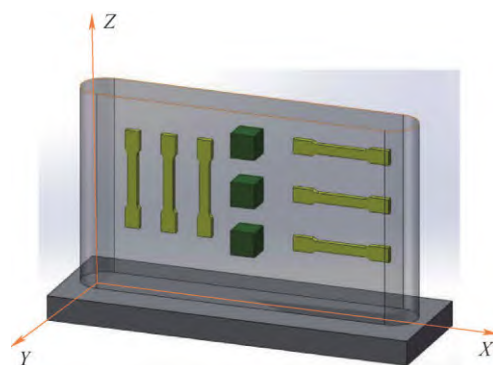
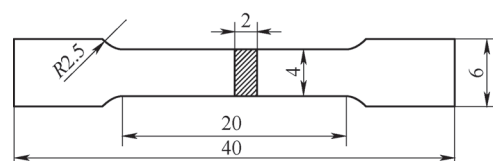


图2 电弧摆动

进行,拉伸速度为1mm/min。不同方向拉伸试样及拉伸试样的位置、数量和尺寸如图3所示。



a) 拉伸试样的位置、数量



b) 拉伸试样尺寸

图3 拉伸性能测试试样

3 试验结果与讨论

3.1 组织分析

光学金相显微镜下的AZ31镁合金试样上、中、下三部分的微观组织如图4所示。由图4可看出,CMT电弧增材制造的AZ31镁合金薄壁构件组织主要由等轴晶构成,其晶粒大小由试样下部至上部晶粒有所增大。其原因为在施焊过程中温度梯度逐渐减小,凝固速率降低,晶粒发生长大;由图4还可看出,每个试样中部区域都有明显的晶粒突变现象发生,晶粒尺寸突然变大且排列更加不规则。进一步观察发现,晶粒突变现象多发生于镁合金AZ31薄壁构件沉积层的层间位置。其原因是在沉积过程中对下方沉积层继续加热,使原本正常长大的晶粒发生二次再结晶。采用Image-Pro Plus软件对不同摆动方式的中部试样晶粒尺寸进行统计分析,晶粒分布如图5所示,无摆动、螺旋摆动的平均晶粒尺寸分别为46.9 μm ,36.7 μm 。由图5可看出,采用电弧摆动的试样其整体晶粒尺寸比无摆动的尺寸小,电弧摆动对晶粒长大行为的影响主要有以下两个因素。

1) 电弧摆动引起的熔池搅拌作用。CMT电弧会产生等离子体,并对熔池表面产生电弧压力和剪切力。熔池内部的电磁力会推动流体径向向内流

动，然后沿着轴向向下流动，产生自上而下的回流。这可以产生足够的熔池搅拌，导致枝晶破碎，提供更多的非均匀形核质点，从而细化晶粒尺寸。随着不同的电弧摆动的加入会使熔池的流动更加复杂，增加了不同方向的涡流，进而导致细化晶粒的作用更加显著^[18]。

2) 成分过冷会产生晶粒细化作用。晶粒形貌受温度梯度与晶粒生长速率比 (G/R) 的控制，而晶粒生长受到 $G \times R$ 的控制。随着结构过冷度的增加，组织由平面晶向胞状晶转变，再由枝晶向等轴晶转变。电弧摆动的加入，可以降低熔池温度梯度，根据结构过冷理论，生长界面前沿的过冷度增大。当成分过冷超过形核所需的过冷度时，新的等轴晶会在尖端前方的异质形核质点上形核。当这些新的等轴晶生长显著时，它们会阻碍柱状晶的生长，导致柱状晶到等轴晶的转变^[21]。

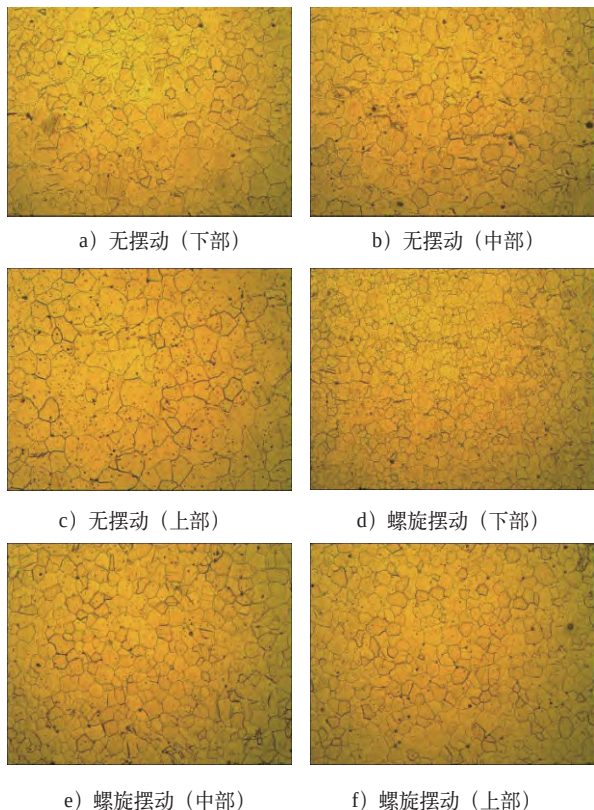


图4 AZ31镁合金薄壁构件截面的光学显微照片

3.2 性能分析

AZ31镁合金薄壁构件不同部位的显微硬度如图6所示。根据图6中数据计算可得出，电弧无摆动、螺旋摆动试样的平均显微硬度值分别为57.0HV、62.7HV。电弧发生摆动的试样显微硬度略高于电

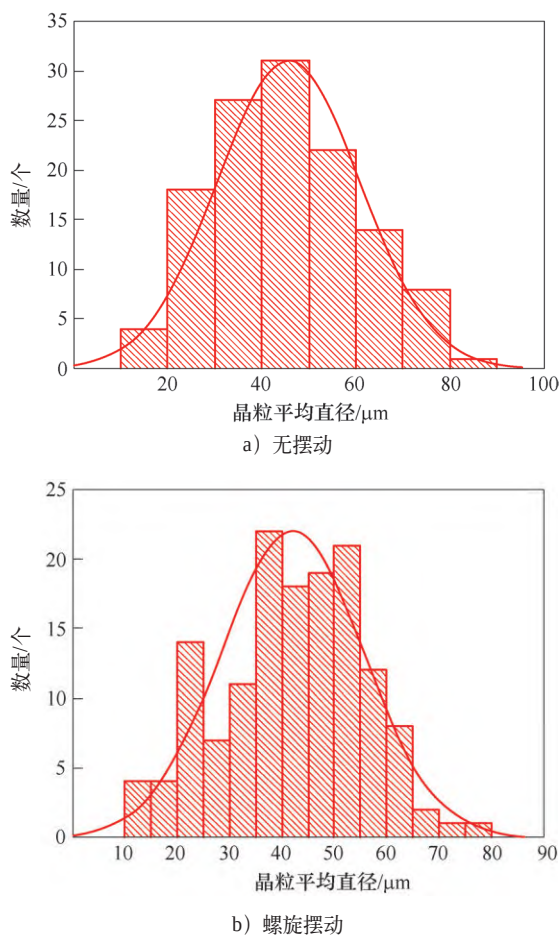


图5 AZ31镁合金薄壁构件中部试样晶粒分布

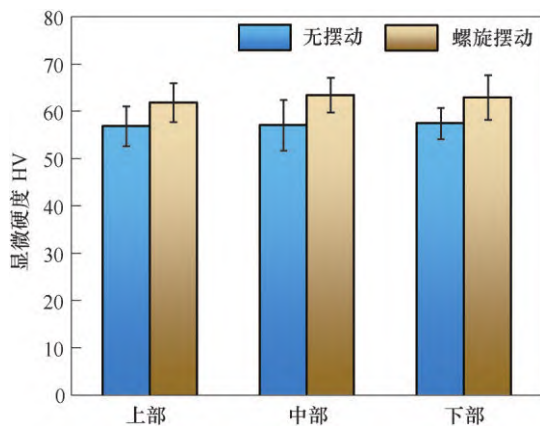


图6 AZ31镁合金薄壁构件不同部位的显微硬度

弧无摆动试样，其原因为电弧摆动使熔池在施焊过程中发生振动，进而使枝晶破碎，有了更多的形核点，起到细化晶粒的作用，此外电弧摆动使熔池热量分布更均匀，冷却速度加快，过冷度增加，进而细化晶粒。晶粒尺寸越细小，其硬度越高，因此电弧摆动的试样得到的显微硬度高于无电弧摆动试样。

图7所示为AZ31镁合金薄壁构件试样的纵向、横向拉伸试样抗拉强度与伸长率的比较。电弧摆动下横向和纵向拉伸试样极限抗拉强度分别达到216MPa和221MPa，而无摆动横向拉伸试样和纵向试样的极限抗拉强度分别为196MPa和201MPa。可以看出纵向拉伸试样的抗拉强度与横向拉伸试样相当。由于显微组织为等轴晶，故CMT-WAAM AZ31镁合金薄壁构件没有明显的各向异性。同时未添加电弧摆动试样的拉伸性能具有相当显著的分散性，随着电弧摆动的加入，对拉伸性能的分散性有较好的改善作用。这是因为尽管CMT-WAAM AZ31镁合金试样的显微组织十分均匀，但缺陷的尺寸分布实际上相当广泛。孔隙等缺陷对力学性能十分不利，因此当拉伸性能试样中存在孔隙等缺陷时，将会导致拉伸性能有所不同。而通过电弧摆动的加入，会使熔池得到更加充分的搅拌作用，这将使熔池中的气孔等缺陷减少。此外，电弧摆动试样的抗拉强度明显高于无摆动试样，这是由于在成形过程中加入了电弧摆动，因此在施焊过程中熔池产生一定振荡，使其中枝晶破碎，从而细化晶粒，且使组织更加均匀，提升了试样的延展性和抗拉强度。

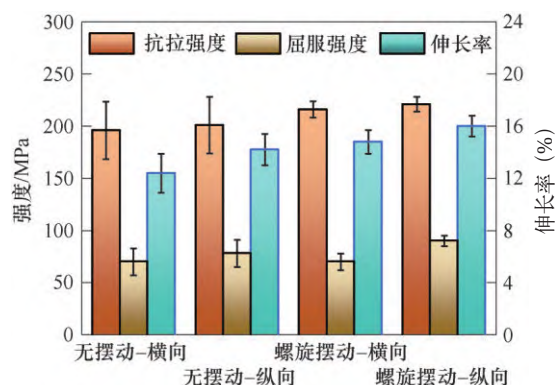


图7 CMT电弧增材制造AZ31镁合金薄壁构件拉伸性能

CMT-WAAM AZ31镁合金的横向和纵向拉伸试样的断口形貌如图8所示。由图8可看出，所有拉伸试样的断口处边缘都没有明显扭曲和撕裂痕迹，断口处并没有明显的纤维区与剪唇区分界现象。这些特征表明，试样在拉伸过程中并没有经历太多塑性变形，还表明试样在拉断过程中颈缩现象并不明显。从断口纤维区的局部放大图可看出，所有拉伸试样断口处都存在较多的韧窝结构，表明试样断裂均为韧性断裂。相比于电弧无摆动试样的韧窝结构，电弧摆动试样断口处韧窝结构数量增多、尺寸

增大，韧窝更深，这表明加入电弧摆动的拉伸试样的塑韧性明显高于电弧无摆动的拉伸试样。对比横向拉伸试样和纵向拉伸试样，横向拉伸试样的韧窝结构数量、尺寸与纵向拉伸试样几乎相当。

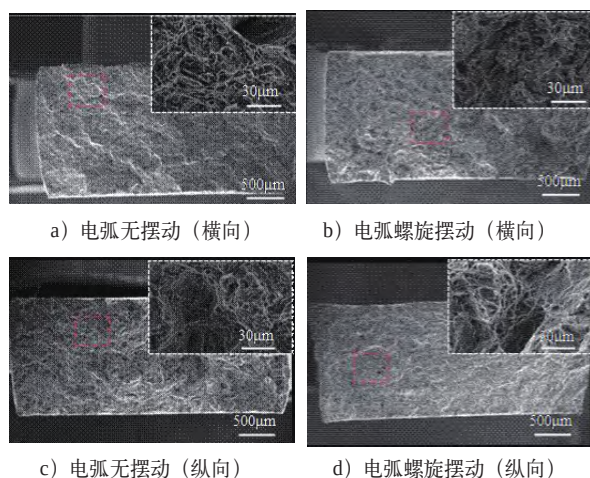


图8 拉伸试样断口形貌SEM显微照片

4 结束语

1) 采用CMT技术可制备具有大量等轴晶粒的AZ31镁合金薄壁构件。电弧摆动的加入可以明显改善熔覆层中部层厚不均匀的现象，并起到细化晶粒的作用。

2) 电弧摆动会对成形件的力学性能产生一定的影响。与无摆动试样相比，电弧摆动的试样组织更均匀且晶粒更细小，进而提高合金的力学性能。

3) CMT制备的AZ31镁合金薄壁构件的拉伸性能没有明显的各向异性，主要原因是合金中几乎全为等轴晶。

参考文献:

- [1] 闫志飞, 田光元, 苏辉, 等. 高性能镁合金的研究进展[J]. 铸造技术, 2023, 44 (2): 101-113.
- [2] 徐春杰, 华心雨, 马东, 等. 选区激光熔化AZ91D镁合金的组织与性能[J]. 铸造技术, 2021, 42 (9): 749-753.
- [3] LUO K, ZHANG L, WU G, et al. Effect of Y and Gd content on the microstructure and mechanical properties of Mg-Y-RE alloys[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2019, 7 (2): 345-354.
- [4] LIN X, HUANG W. High performance metal additive manufacturing technology applied in aviation field[J]. Materials China, 2015, 34: 684-688.
- [5] DEBROY T, WEI H L, ZUBACK J, et al. Additive

- manufacturing of metallic components – process, structure and properties[J]. Progress in Materials Science, 2018, 92: 112-224.
- [6] KARUNAKARAN R, ORTGIES S, TAMAYOL A, et al. Additive manufacturing of magnesium alloys[J]. Bioactive Materials, 2020, 5 (1) : 44-54.
- [7] NG C C, SAVALANI M M, LAU M L, et al. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted magnesium[J]. Applied Surface Science, 2011, 257 (17) : 7447-7454.
- [8] KIMURA T, NAKAMOTO T, OZAKI T, et al. Microstructural formation and characterization mechanisms of selective laser melted Al-Si-Mg alloys with increasing magnesium content[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 754: 786-798.
- [9] CONG B Q, CAI X Y, QI Z W, et al. The effects of ultrasonic frequency pulsed arc on wire+arc additively manufactured high strength aluminum alloys[J]. Additive Manufacturing, 2022, 51: 102617.
- [10] CAO Q H, QI B J, ZENG C Y, et al. Achieving equiaxed microstructure and isotropic mechanical properties of additively manufactured AZ31 magnesium alloy via ultrasonic frequency pulsed arc[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 909 (15) : 164742.
- [11] KNEZOVIĆ N, TOPIĆ A. Wire and arc additive manufacturing (WAAM) – A new advance in manufacturing[J]. Springer, Cham., 2018, 42: 65-71.
- [12] RODRIGUES T A, BAIRRÃO N, FARIAS F W C, et al. Steel-copper functionally graded material produced by twin-wire and arc additive manufacturing (T-WAAM) [J]. Materials & Design, 2022, 213: 110270.
- [13] FANG X, ZHANG L, CHEN G, et al. Microstructure evolution of wire-arc additively manufactured 2319 aluminum alloy with interlayer hammering[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 800 (7) : 140168.
- [14] JING G, YONG Z, LIU C M, et al. Wire arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy: grain refinement by adjusting pulse frequency[J]. Materials, 2016, 9 (10) : 823.
- [15] WANG P, ZHANG H, ZHU H, et al. Wire-arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy fabricated by cold metal transfer heat source: processing, microstructure, and mechanical behavior[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 288: 116895.
- [16] YANG X, LIU J R, WANG Z N, et al. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured AZ31 magnesium alloy using cold metal transfer process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 744 (13) : 138942.
- [17] KOU S, LE Y. Grain structure and solidification cracking in oscillated arc welds of 5052 aluminum alloy[J]. Metallurgical Transactions: A, 1985, 16 (7) : 1345-1352.
- [18] YUAN T, LUO Z, KOU S. Mechanism of grain refining in AZ91 Mg welds by arc oscillation[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2017, 22 (2) : 97-103.
- [19] WEI Y, LIU F, LIU F, et al. Effect of arc oscillation on porosity and mechanical properties of 2319 aluminum alloy fabricated by CMT-wire arc additive manufacturing[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 3477-3490.
- [20] LIU K, YAN Z, WANG F, et al. Microstructure, texture and mechanical properties of Inconel GH4169 superalloy fabricated by wire arc additive manufacturing with arc oscillation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 952: 170070.
- [21] WU B, QIU Z, DONG B, et al. Effects of synchronized magnetic arc oscillation on microstructure, texture, grain boundary and mechanical properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy[J]. Additive Manufacturing, 2022, 54: 102723.

MW 20240614