文章编号：1003－1251(2024)05－0077－06

预处理对 TiB_2 增强铝基复合材料电弧增材影响

孙焕焕，赵 亮，蒋 鹏，刘易麟，冯鑫源，刘 萍

（沈阳理工大学 材料科学与工程学院，沈阳 110159）

摘 要：以 TiB_2/6056 铝基复合材料丝材为焊材，采用冷金属过渡焊接技术，研究 TiB_2 增强铝基复合材料丝材的电弧增材，重点分析预热处理对增材层成形及接头质量的影响。结果表明：当焊接电流为 140 A、送丝速度为 8 m/min、焊接速度为 5 mm/s、基板预热温度为 200 ℃时制备的增材层与基板未预热制备的增材层相比，外观成形更好，气孔数目降低，气孔尺寸减小，晶粒更细小，TiB_2 颗粒分散更好，且增材层硬度与拉伸性能均得到了提高。

关 键 词：冷金属过渡技术；电弧增材；预处理；TiB_2 增强铝基复合材料

中图分类号：TG444 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1003－1251.2024.05.012

Effect of Pre-treatment on Arc Additive Manufacturing of TiB_2 Reinforced Aluminum Matrix Composites

SUN Huanhuan，ZHAO Liang，JIANG Peng，LIU Yilin，FENG Xinyuan，LIU Ping

（Shenyang Ligong University，Shenyang 110159，China）

Abstract：Using TiB_2/6056 aluminum based composite wire as welding material and cold metal transition welding technology，the arc additive of TiB_2 reinforced aluminum based composite wire was studied，with a focus on the influence of preheating treatment on the formation of additive layer and joint quality. The results showed that when the welding current was 140 A，the wire feeding speed was 8 m/min，the welding speed was 5 mm/s，and the substrate preheating temperature was 200 ℃，the additive layer prepared had better appearance，lower number of pores，smaller pore size，finer grain size，better TiB_2 particle dispersion，and improved hardness and tensile properties compared to the additive layer prepared without substrate preheating.

Key words：cold metal transition technology；arc additive；pre-processing；TiB_2 reinforced aluminum matrix composites

原位自生的二硼化钛（TiB_2）颗粒增强铝基复合材料具有较高的比强度、比模量，且耐高温、抗疲劳性能好[1－2]，已成为航空航天、国防军工等众多领域的潜能材料[3－4]。

电弧增材制造（WAAM）也被称为3D打印技术[5]，是一种新兴的增材制造技术。该技术具有沉积速率高、材料利用率高和设备成本低等优点[6－8]。传统的电弧增材技术主要包括埋弧焊增材制造、熔化极气体保护焊增材制造以及非熔化极气体保护焊增材制造等[9]。传统的电弧增材方法热输入大，容易造成晶粒粗大、材料性能差、组织不均匀等问题[10]，影响了电弧增材的应用与发展。为降低增材过程中的热输入、减小对基体的热损伤、提高增材速率，涌现出冷金属过渡

收稿日期：2023－12－18

基金项目：辽宁省自然科学基金面上项目（2022－MS－275）

作者简介：孙焕焕（1979—），女，副教授，博士，研究方向为铝基复合材料焊接及增材制造。

(CMT)焊接技术、基板预热、焊丝预热等新型增材技术,但关于铝基复合材料增材中基板预热处理对增材后组织及性能影响的研究甚少,而预热温度对增材件的成型、组织及性能均有影响。

本文以原位自生 TiB_2/6056 铝基复合材料丝材为焊材,采用 CMT 技术对该复合材料进行电弧增材,研究预热温度对其组织和性能的影响。课题研究工作旨在进一步拓宽 TiB_2 颗粒增强铝基复合材料的应用领域、充分发挥其性能优势。

1 试验部分

1.1 试验材料与设备

试验所用 TiB_2/6056 铝基复合材料焊丝由上海交通大学特种材料研究所自主研发[11],焊丝直径为 1.2 mm,TiB_2 增强相的质量分数为 2.5%。基板(6061 铝合金)及焊丝基体(6056 铝合金)的主要化学成分见表 1。

表 1 基板与焊丝基体主要化学成分

Table 1 Main chemical compositions of substrate material and welding wire matrix wt%

	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Al
6061 铝合金	0.7	0.8	0.5	0.3	0.15	余量
6056 铝合金	1.3	1.2	0.5	0.6	0.5	余量

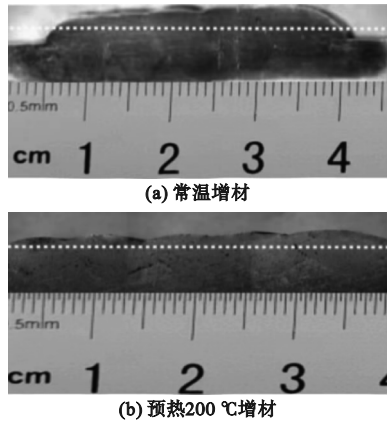
增材试验设备为冷金属过渡焊机(TransPuls Synergic 4000 型,奥地利伏能士),其采用焊接机器人(Robot R-OIA,FANUC)系统,主要包括机械手臂、控制箱、示教器等。

1.2 试验方法

基于前期研究,增材制备参数为:焊接电流 140 A,送丝速度 8 m/min,焊接速度 5 mm/s,保护气选择浓度为 99.999% 的氩气,保护气流量为 25 L/min[4]。分别选取常温和预热温度为 200 ℃制备的基板进行试验。

两种不同预热温度下分别制备 TiB_2/6056 复合材料单层单道、单层五道增材。采用线切割从增材层上切取金相、硬度以及拉伸试样。金相试样经过打磨、抛光后,用凯勒(Keller)溶液腐蚀,随后用显微镜(Axiocam105color 型,ZEISS)观察增材焊道的截面,最后用光学显微镜(GX53,OLVMPUS)及扫描电镜(MIRA3,TESCAN)对微观组织进行观察。

图 1 为常温与预热 200 ℃单层五道增材显微维氏硬度打点示意图,沿图中白色虚线从左侧首道至右侧末尾道每隔 2 000 μm 打一个点(加载力为 5 N,持续时间为 15 s),并且在该线上下 100 μm 处依次每隔 1 000 μm 打点,共打 60 个点,将每纵向三点测试结果取平均值。



(a) 常温增材

(b) 预热200 ℃增材

图 1 单层五道增材截面图

Fig. 1 Cross-sections of single-layer five-channel additives

切取三个试样在万能电子拉伸试验机(UTM4304 型,山东万辰试验机有限公司)上进行拉伸试验,取三个试样拉伸数据的平均值。用扫描电镜对拉伸断口进行分析。试验条件为室温,加载速度为 1 mm/min。拉伸试样尺寸如图 2 所示。

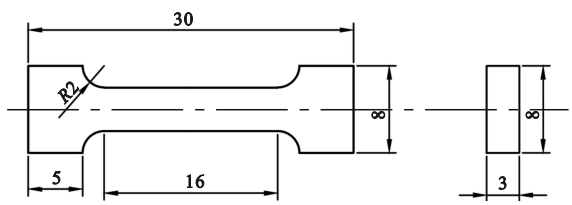


图 2 拉伸试样尺寸(单位:mm)

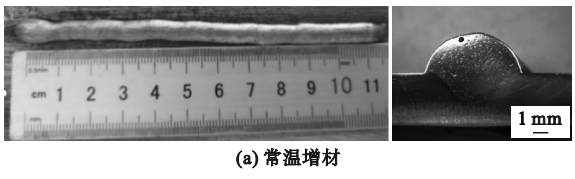
Fig. 2 Tensile specimen size(unit:mm)

2 结果与分析

2.1 外观形貌

图 3 为常温与预热温度下单层单道增材的宏观形貌。

由图 3(a)可见,常温增材道头部呈水滴状,焊道过窄,表面平整度不高。由图 3(b)可见,增材道平直光滑,成形美观,且增材道宽度由 9.6 mm 增加到 11.4 mm。这是由于基板经过预热处理后,熔融金属与基板之间温差减小,液态金属停留时间变长,能够充分铺展。



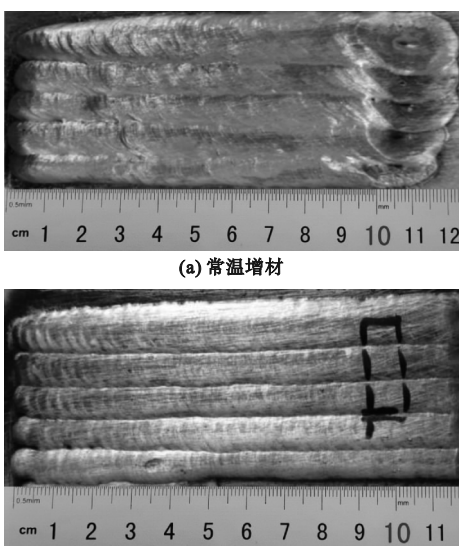
(a) 常温增材

(b) 预热200 ℃增材

图 3　单层单道增材宏观形貌

Fig. 3　Macromorphologies of single layer additives

图 4 为常温与预热温度下单层五道增材层宏观形貌。



(a) 常温增材

(b) 预热200 ℃增材

图 4　单层五道增材宏观形貌

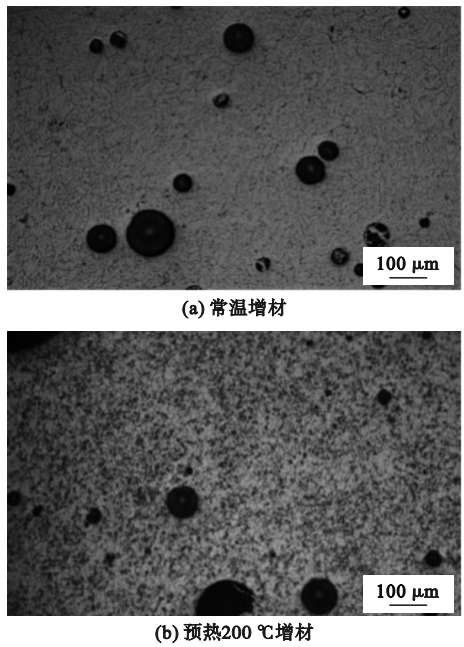
Fig. 4　Macromorphologies of single layer five-channel additives

由图 4(a)可见,常温增材层头部窄而尾部宽的特点并未得到改善,反而更加严重,使得增材层头尾尺寸存在较大偏差。基板进行预热后的五道增材层尺寸均匀,且表面形貌平整,如图 4(b)所示。

2.2　气孔分布

气孔缺陷会对铝合金构件的力学性能产生严重影响,直径大于 50 μm 的气孔极易形成裂纹源,显著降低构件的耐疲劳性能和强度。气孔一直是铝合金及铝基复合材料电弧增材的重要问题[12]。

图 5 为常温与预热 200 ℃条件下 CMT 辅助脉冲焊接时获得的复合材料增材中心区气孔分布图。



(a) 常温增材

(b) 预热200 ℃增材

图 5　增材道中心区气孔分布图

Fig. 5　Pore distribution in the central region of the additive channel

由图 5 可见,两种不同工艺的增材道氢气孔大多为规则的圆形。通过测量,常温增材的氢气孔直径范围为 7.9 ~ 822.2 μm,热处理后增材的氢气孔直径范围为 5.4 ~ 676.7 μm。为方便计算气孔数目,随机在不同工艺下的增材道中各自选取五个不同位置进行观察,在单位面积为 1 mm^2 的范围内观察到平均气孔数目分别为 32 和 19 个,如图 6 所示。经计算,热处理后增材气孔数目以及气孔直径分别减少 40% 和 17% 左右。

结合图 3 和图 5 可见,常温增材的氢气孔大多集中于增材道上部以及熔覆道边缘位置,且伴随粗大气孔存在,而经过预处理,这种情况有所改善。造成这种差异的原因主要是:在 TiB_2 增强铝基复合材料中,TiB_2 颗粒的存在增加了焊缝熔池黏度,降低了熔池流动性;而 TiB_2 粒子对气孔的逸出有阻碍作用,增加了气孔敏感性,导致气孔较多[13]。预热后基板的温度升高,在一定程度上增加了熔融复合材料的流动性,提高了气孔溢出速率,故预热后的增材层气孔数目与尺寸均低于常温增材。

2.3　预热对晶粒度的影响

图 7 为常温与预热 200 ℃条件下增材时获得的复合材料增材中心区微观组织照片。如图 7 可见,两种不同工艺所得到的晶粒多为等轴晶,并且经预热处理后晶粒较未预热处理晶粒更为细小。

这是由于基板进行预热后,液态熔融金属冷却速度变慢,在高温下停留的时间变长,熔体中的 TiB_2 颗粒分散更加均匀,TiB_2 颗粒可以作为 α-Al 异质形核的核心,提高 α-Al 形核率。已经成核的 α-Al 晶粒表面被分散在熔体中的 TiB_2 颗粒覆盖,形成封闭“薄壳”,阻止铝原子迁移到生长界面,限制晶粒的生长,故基板预热后复合材料的晶粒组织得了一定的细化。

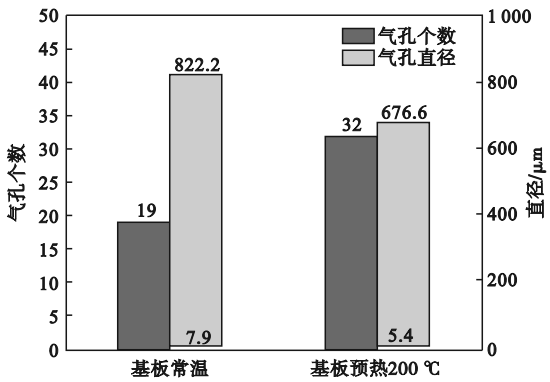


图 6 不同基板温度气孔个数及直径范围统计图

Fig. 6 Statistics of the number and diameter range of pores at different substrate temperatures

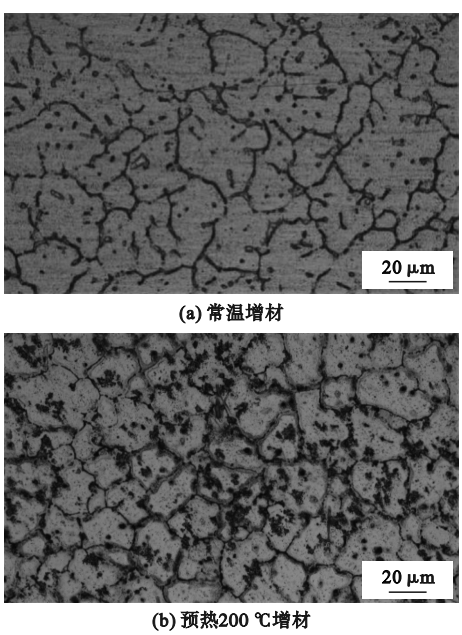


图 7 增材道中心区微观组织

Fig. 7 Microstructure of the central region of the additive channel

2.4 增材层中 TiB_2 颗粒分布

为研究 TiB_2 颗粒在基体的分布情况,分别选取常温与预热处理的增材层中间部分进行扫描电镜观察,如图 8 所示,图中白色颗粒状物质为 TiB_2 颗粒。由图 8 可见,基板经预处理后增材与常温增材相比,TiB_2 颗粒在晶界处分布更加均匀。这是由于常温增材中的 TiB_2 颗粒因液态金属冷却速度快,故分散性差,呈聚集态分布,其主要分布在 α-Al 晶体的晶界上。预热处理后增材,熔化的液态金属冷却速度变慢,停留时间变长,流动性增强,TiB_2 颗粒在晶界处分散更好。

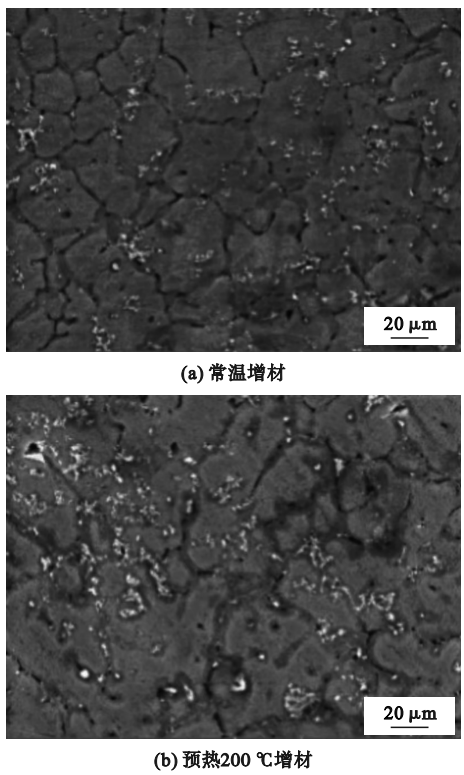


图 8 扫描电镜图片

Fig. 8 SEM images

2.5 硬度分析

图 9 为单层五道增材显微硬度图。由图可知,基板预热后增材层的硬度略高于常温增材层,基板预热后增材层的平均硬度为99.3HV,常温

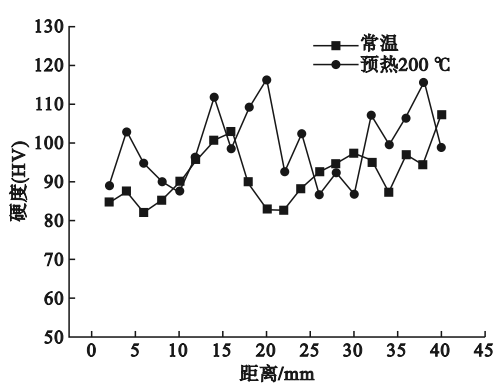


图 9 单层五道增材显微硬度

Fig. 9 Microhardness of single-layer five-channel additives

增材层的平均硬度为 92 HV。结合微观组织结果分析,复合材料在经过基板预热后增材,晶粒得到细化,并且在预热作用下,复合材料中的 TiB_2 颗粒分布更加均匀,起到了强化作用,硬度得到一定程度的提升。

2.6　拉伸性能及断口分析

图 10 为多道增材层拉伸性能。基板常温状态时,平行向抗拉强度为 206 MPa,断面延伸率为 8.1%;基板预热 200 ℃时,平行向抗拉强度为 248 MPa,断面延伸率为 11.2%,增材层的抗拉强度与断面延伸率分别提高了 20.3%、38.2%。基板预热后,液态金属停留时间变长,在一定流变应力作用下,细小等轴晶的晶界易发生晶界滑移机制,TiB_2 颗粒的异质形核作用和对晶界的钉扎作用,使位于晶界上的 TiB_2 颗粒阻碍晶界的移动,增强了基板增材层的拉伸性能[14]。

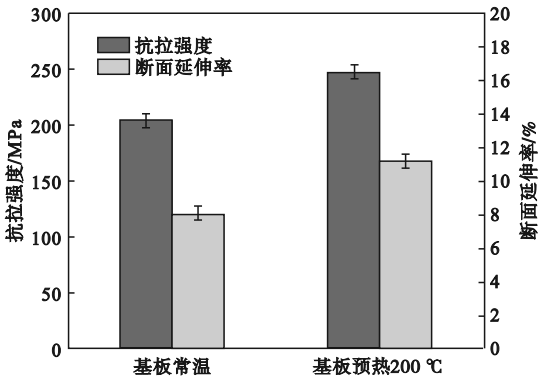
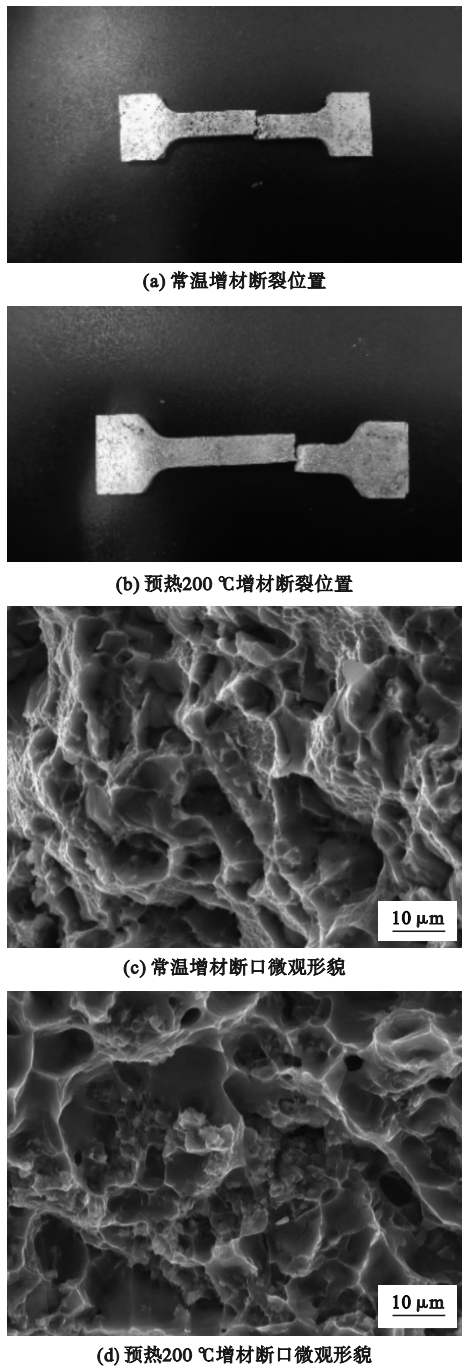


图 10　拉伸试样的性能

Fig. 10　Properties of tensile specimens

分别对常温和预热处理的基板进行平行向拉伸,直至断裂,断裂位置及断口形貌如图 11 所示。

由图 11(a)和 11(b)可见,常温状态下,在气孔聚集处断裂,而经预热处理后,断口与拉伸方向呈 45°夹角,并且表面并无气孔聚集。由图 11(c)可见,断口由大量韧窝组成,韧窝尺寸较小,数量较多。由图 11(d)可见,韧窝大小与深度均大幅增加。已有研究表明[15],韧窝的尺寸较大或较深时,材料的塑性更好,这与拉伸结果相符合。图 11(d)中 TiB_2 颗粒分布于韧窝底部和侧面,表明 TiB_2 颗粒可以促进韧窝的形成并限制晶界在拉伸作用下的移动[16]。



(a) 常温增材断裂位置

(b) 预热200 ℃增材断裂位置

(c) 常温增材断口微观形貌

(d) 预热200 ℃增材断口微观形貌

图 11　拉伸试样断裂位置及断口形貌

Fig. 11　Fracture locations and fracture morphologies of tensile specimens

3　结论

本文通过冷金属过渡电弧增材试验,研究预热处理对 TiB_2 颗粒增强铝基复合材料丝材的电弧增材影响,主要结论如下。

1)基板预热 200 ℃制备的增材层与常温制备的增材层相比,沉积层的铺展性好、表面光滑平

整,产生的气孔数目与气孔直径分别减少了 40% 和 17%,并且改善了增材道边缘处气孔分布集中的现象。

2)微观组织分析结果表明,经预热处理后增材层中 TiB_2 颗粒分布在晶界处与晶粒内部,常温增材层中 TiB_2 颗粒大多存在于 α-Al 晶界处。

3)基板进行 200 ℃预热得到的增材层硬度提高了 8%、平行向抗拉强度提高了 20.3%、断面延伸率提高了 38.2%,拉伸断裂方式为韧性断裂。

参考文献(References):

[1] 曹遴,陈彪,郭柏松,等. 碳纳米管增强铝基复合材料分散方法研究进展[J]. 精密成形工程,2021,13(3):9-24.
CAO L,CHEN B,GUO B S,et al. A review of carbon nanotube dispersion methods in carbon nanotube reinforced aluminium matrix composites manufacturing process[J]. Journal of Netshape Forming Engineering,2021,13(3):9-24. (in Chinese)

[2] KUMAR DEEPATI A,ALHAZMI W,BENJEER I. Mechanical characterization of AA5083 aluminum alloy welded using resistance spot welding for the lightweight automobile body fabrication [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45: 5139-5148.

[3] 曹遴,陈彪,贾振东,等. 铝基复合材料研究进展及其航空航天应用[J]. 铸造技术,2023,44(8):685-705.
CAO L,CHEN B,JIA Z D,et al. Research progress and aerospace applications of aluminum matrix composite[J]. Foundry Technology,2023,44(8):685-705. (in Chinese)

[4] 冯杨. TiB_2 增强铝基复合材料电弧增材制造工艺与性能研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2022.

[5] 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.
YU S F,YU R Z,HE T Y,et al. Wire arc additive manufacturing and its application:research progress[J]. Materials China,2021,40(3):198-209. (in Chinese)

[6] YI H,JIA L,DING J L,et al. Achieving material diversity in wire arc additive manufacturing:leaping from alloys to composites via wire innovation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2024,194:104103.

[7] HE F Y,YUAN L,MU H C,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.

[8] ZHANG L,BIAN W ZH,FU K,et al. Improvement of mechanical properties and microstructure of wire arc additive manufactured 2319 aluminum alloy by mechanical vibration acceleration [J]. Materials Characterization, 2024, 208: 113672.

[9] 王钰,王凯,丁东红,等. 金属熔丝增材制造技术的研究现状与展望[J]. 电焊机,2019,49(1):69-77,123.
WANG Y,WANG K,DING D H,et al. Research status and prospect of metal wire additive manufacturing technology[J]. Electric Welding Machine,2019,49(1):69-77,123. (in Chinese)

[10] 宋峰雨,张朋彦,王平,等. 大热输入焊接材料的研究开发现状[J]. 中国冶金,2015,25(12):7-11.
SONG F Y,ZHANG P Y,WANG P,et al. Research and development status of high heat input welding materials[J]. China Metallurgy,2015,25(12):7-11. (in Chinese)

[11] 孙焕焕,冯杨,李险峰,等. TiB_2/6056 复合材料的电弧增材制造工艺及组织分析[J]. 热加工工艺,2023,52(21):44-48,54.
SUN H H,FENG Y,LI X F,et al. Analysis on arc additive manufacturing process and microstructure of TiB_2/6056 composites[J]. Hot Working Technology,2023,52(21):44-48,54. (in Chinese)

[12] 石寅晖,李洁,刘坤,等. 铝合金电弧熔丝增材制造的冶金缺陷研究现状与展望[J]. 材料热处理学报,2023,44(6):1-10.
SHI Y H,LI J,LIU K,et al. Research progress and prospect of metallurgical defects in wire arc additive manufacturing of aluminum alloys[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2023,44(6):1-10. (in Chinese)

[13] 崔海超,芦凤桂,唐新华,等. 原位生成铝基复合材料的激光焊接[J]. 焊接学报,2010,31(8):68-72,116.
CUI H C,LU F G,TANG X H,et al. Laser welding of in situ particulate reinforced aluminum matrix composites[J]. Transactions of the China Welding Institution,2010,31(8):68-72,116. (in Chinese)

[14] 王文权,王苏煜,陈飞,等. 选区激光熔化成形 TiN/Inconel 718 复合材料的组织和力学性能[J]. 金属学报,2021,57(8):1017-1026.
WANG W Q,WANG S Y,CHEN F,et al. Microstructure and mechanical properties of TiN/inconel 718 composites fabricated by selective laser melting[J]. Acta Metallurgica Sinica,2021,57(8):1017-1026. (in Chinese)

[15] 朱浩,朱亮,陈剑虹,等. 不同应力状态下铝合金变形及损伤机理的研究[J]. 稀有金属材料与工程,2007,36(4):597-601.
ZHU H,ZHU L,CHEN J H,et al. The study of deformation and damage mechanism of aluminum alloy(6063) under different stress states[J]. Rare Metal Materials and Engineering,2007,36(4):597-601. (in Chinese)

[16] 王浩伟. 原位自生陶瓷颗粒增强铝基复合材料制备及应用[J]. 航空制造技术,2021,64(16):14-26.
WANG H W. Preparation and application of in-situ ceramic particles reinforced Al matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2021,64(16):14-26. (in Chinese)

(责任编辑:徐淑姣)