



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.05.01

轨道交通用钛合金摆动激光-电弧复合增材成形、组织及力学性能研究

孙术娟¹, 马寅², 郝守雨^{3,4}, 刘福运^{3,4*}, 韩晓辉², 檀财旺^{3,4}

1. 国家铁路局装备技术中心, 北京 100036

2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111

3. 哈尔滨工业大学 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

4. 哈尔滨工业大学(威海) 山东省特种焊接技术重点实验室, 山东 威海 264209

摘要: 研究了不同激光摆动参数对激光-电弧复合增材制造轨道交通用TC4钛合金成形质量、微观组织及力学性能的影响。与传统的电弧增材制造相比, 摆动激光能诱导电弧, 增强了增材过程电弧稳定性。采用0.5 mm的小摆幅时增材成形质量较好, 而激光不摆动时成形起伏较大, 摆幅1 mm时则墙体粗糙度较大。在摆动幅度为0.5 mm时, 形成典型的钉子状熔深, 有效细化了晶粒尺寸, 而当激光不摆动和摆幅过大时, 熔合线近乎水平, 晶粒垂直向上连续生长, 导致晶粒尺寸粗大。在0.5 mm摆幅下, 细化晶粒效果最为显著, 试样的拉伸性能最佳, 横向拉伸强度为814.74 MPa, 纵向拉伸强度可达到949.07 MPa。

关键词: 钛合金; 摆动激光; 增材制造; 成形; 组织性能

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)05-0001-11

Study on Forming, Microstructure and Mechanical Properties of Oscillating Laser-arc Hybrid Additive of Titanium Alloy for Rail Transit

SUN Shujuan¹, MA Yin², HAO Shouyu^{3,4}, LIU Fuyun^{3,4*}, HAN Xiaohui², TAN Caiwang^{3,4}

1. Equipment Technology Center, National Railway Administration, Beijing 100036, China

2. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China

3. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

4. Shandong Provincial Key Laboratory of Special Weiding Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China

Abstract: This study investigates the effects of different laser oscillation parameters on the forming quality and microstructural properties of rail transit titanium alloy fabricated by laser-arc hybrid additive manufacturing. The results indicate that oscillating laser can induce arc stabilization, thereby enhancing process stability during deposition. When employing a small oscillation amplitude of 0.5 mm, superior formation quality was achieved, whereas non-oscillated laser resulted in significant surface undulations and a 1 mm amplitude caused increased wall roughness. At the optimal 0.5 mm amplitude, typical nail-shaped molten pool penetration was formed, which effectively refined grain size. In contrast, nearly horizontal fusion lines with continuous vertical grain growth were observed under non-oscillation and excessive amplitude conditions, leading

收稿日期: 2025-03-21 修回日期: 2025-04-02

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB3407800)

作者简介: 孙术娟(1973—), 女, 正高级工程师, 主要从事动车组源头质量监管、动车组新技术研究等方面研究。

通讯作者: 刘福运(1995—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事先进激光焊接与再制造技术研究工作。E-mail: liufuyun_laser@163.com。

to coarse grain structures. The 0.5 mm amplitude demonstrated the most significant grain refinement effect, contributing to optimal tensile properties with the specimen achieving a tensile strength of 949.07 MPa.

Keywords: titanium alloy; oscillating laser; additive manufacturing; forming; microstructure and properties

引用格式:孙术娟,马寅,郝守雨,等. 轨道交通用钛合金摆动激光-电弧复合增材成形、组织及力学性能研究[J]. 电焊机,2025,55(5):1-11.

Citation:SUN Shujuan, MA Yin, HAO Shouyu, et al. Study on Forming, Microstructure and Mechanical Properties of Oscillating Laser-arc Hybrid Additive of Titanium Alloy for Rail Transit[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(5): 1-11.

0 引言

钛合金由于具备高比强度、低密度和优异的耐腐蚀性等特性^[1],被广泛应用于轨道交通、航空航天和海洋船舶等领域^[2-4]。然而,钛合金的加工面临着诸多挑战,如锻造温度区间窄、变形阻力大,以及其组织性能对生产条件高度敏感等^[5],导致传统工艺生产钛合金部件的工艺复杂、效率低下和成本昂贵等问题。增材制造技术具有成本低,效率高,自由定制的优势,尤其是电弧增材制造技术,以电弧作为热源,通过焊丝熔化逐层堆焊的来制造构件,具有较低成本和较高的沉积效率等优势,在大尺寸钛合金构件的制造中具有广阔应用前景^[6]。

然而在钛合金增材制造的过程中,在电弧的作用下沉积层会反复经历剧烈加热与冷却,从而导致晶粒在沉积过程中持续演变生长^[7-8],发展为粗大的柱状 β 晶粒,导致钛合金构件显著的各向异性与力学性能的降低^[9-10]。因此,在钛合金增材制造构件的工程应用中,如何实现粗大 β 柱状晶的等轴化与晶粒细化,消除构件的各向异性,并提升其综合力学性能,已成为亟待解决的关键技术问题^[11]。

为了改善电弧增材制造钛合金的微观结构并提高其力学性能,国内外的研究人员开展了大量工艺探究以改善组织。许明方等^[12]研究了超声辅助CMT电弧增材制造TC4的微观组织和力学性能,发现在600 W超声功率下, β 柱状晶可被有效震碎并转变为等轴晶,显著改善晶粒细化效果。Tian等^[13]提出了原位轧制技术结合直接能量沉积来制造TC4零件,获得了近乎等轴 β 晶粒与取向更随机的 α 板条,屈服强度和抗拉强度提高了20%。Yang等^[14]发现采用低功率脉冲激光电弧后可以有效减小热输入,从而细化晶粒,提高构件整体性能。符成学^[15]

等采用激光同轴送丝技术制备了TC4增材墙体,发现晶粒取向差随着高度增大而减小,且下层组织晶粒较小,而上层则形成粗大组织,表明热循环控制对组织影响较大。目前,通过摆动激光调控钛合金增材制造组织性能的研究较少,关于摆动激光对电弧增材制造TC4的改善效果并不清晰。

本文针对电弧增材制造TC4合金,引入了摆动激光辅助电弧增材,并将其与传统的电弧增材方法进行了比较,研究了摆动激光对成形效果、微观组织及力学性能的影响。通过实验确定了最佳的摆动幅度参数,并深入分析了摆动激光对电弧及匙孔行为的影响机制,阐明了摆动激光细化晶粒的作用原理。

1 试验方法

试验采用的摆动激光电弧复合增材制造系统如图1所示,其组成主要包括六轴机器人KUKA KR30HA,福尼斯Tps 400i型弧焊机,RFL-c6000型激光器。本研究选用尺寸为150 mm×75 mm×6 mm的TC4钛合金板材作为母材,选取直径1.2 mm的TC4焊丝作为丝材进行增材试验,所用的TC4钛合金的主要元素的含量如表1所示,其主要的物理性能参数如表2所示。试验前对TC4基材实施表面预处理操作:首先进行机械打磨以去除表面氧化物,随后使用丙酮彻底清除油污,接着以清水冲洗干净,最后烘干板材准备进行增材试验。

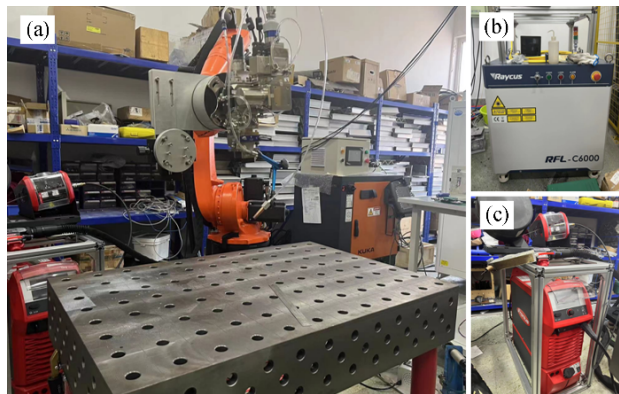
表1 TC4钛合金基板及丝材主要元素含量(质量分数,%)
Table1 Contents of main alloy elements in TC4 base metal and wire (wt. %)

材料	Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
板材	6.11	4.10	0.12	0.155	0.012	0.012	0.001 4	Bal.
焊丝	6.01	4.13	0.09	0.080	0.030	0.010	0.001 1	Bal.

表2 TC4钛合金的主要物理性能参数

Table 2 Main physical properties parameters of TC4 titanium alloy

材料	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断裂伸长率/%
母材	1056	920	11.2
焊丝	1090	930	8.9



(a)增材平台;(b)激光器;(c)焊接电源

图1 用于本试验的增材系统

Fig. 1 Additive system used for the experiment

本研究采用摆动激光-电弧复合热源进行TC4合金增材制造实验,具体的实验过程如图2所示。焊枪内使用纯度为99.99%的氩气作为保护气体,并采用保护拖罩加强对熔池及增材焊道的后部保护。采用往复式的方法在TC4合金基板上进行逐层沉积,沉积层数为20层,层间温度控制在80~120℃。根据前期预实验的结果确定本研究采用的部分参数:激光功率1800 W,保护气流量20 L/min,焊接速度1.2 m/min,光丝间距3 mm,离焦量0mm,焊丝干伸长15 mm,激光摆动频率150 Hz。采用的摆动激光运动轨迹如图3所示,激光摆动类型为圆形轨迹,在工作状态时激光沿着基材表面X方向以恒定焊接速度产生位移,同时在Y方向速度大小和方向周期性的变化,最终呈现出螺旋形的运动轨迹。

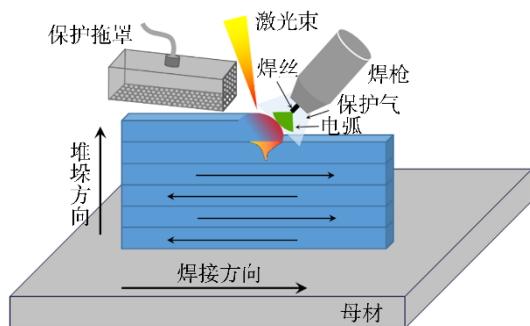


图2 焊接过程示意

Fig. 2 Schematic diagram of the welding process

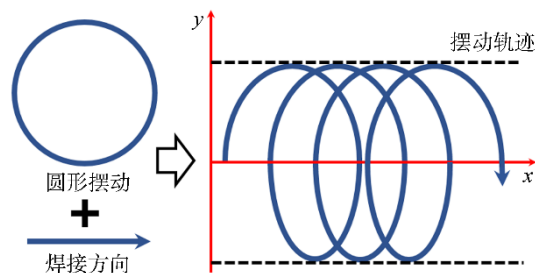


图3 激光光斑摆动轨迹

Fig. 3 Laser oscillation trajectory

为了进行显微组织分析,使用电火花式切割机从TC4合金增材样件上沿着横截面进行线切割,使用金相抛光机将得到的金相件进行打磨抛光,然后利用Kroll腐蚀剂(HF、HNO₃、H₂O的混合液,体积比为1:6:7,对试样进行腐蚀,腐蚀时间约为10~15 s,用无水乙醇冲洗并吹干后使用OLYMPUS DSX510型光学显微镜对金相件显微组织进行观察与分析;此外为探究微观组织对力学性能的影响,在TC4合金增材样件上取横向和纵向拉伸试样,拉伸试样取样位置如图4所示,将拉伸试样在UTM4204X型电子万能试验机进行常温拉伸性能测试,拉伸速度设定为1 mm/min,为确保得到的拉伸强度的准确性,选取相同参数的三个拉伸试样进行拉伸试验,并将结果的平均值作为最终的拉伸强度,通过ZEISS扫描电子显微镜(SEM)分析试样断口形貌特征。

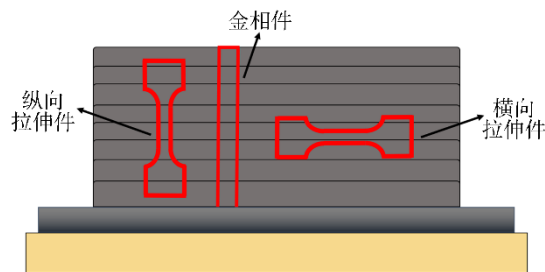


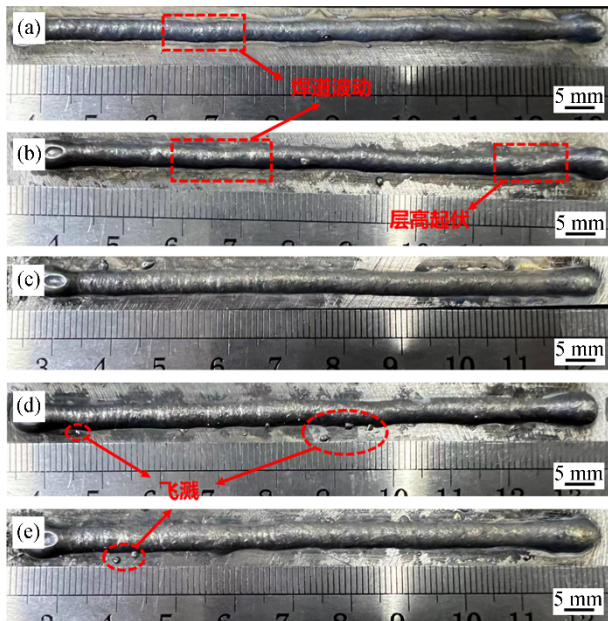
图4 拉伸性能测试样件

Fig. 4 Tensile properties test specimens

2 试验结果与分析

2.1 单层单道增材工艺及成形探究

图5为不同焊接电流下CMT增材TC4试样的表面成形。在电流较小时焊道的左右波动较为显著,并且出现了层高起伏的现象;随着电流的逐步增加,虽然焊道的成形得到了改善,但是焊接时的

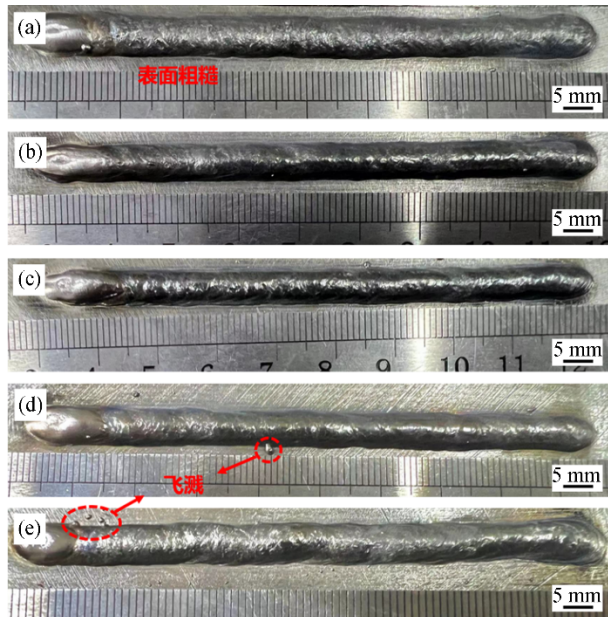


(a) 120 A; (b) 135 A; (c) 150 A; (d) 165 A; (e) 180 A

图5 不同焊接电流CMT增材TC4的成形

Fig. 5 CMT additive TC4 forming under different currents

飞溅增多。在不同摆动幅度的激光辅助下,CMT增材制造的TC4合金试样表面成形情况如图6所示,与图5相比,可以发现在不同激光摆动参数下,焊道更加均匀连续,产生的飞溅显著减少,焊道的成形



(a) A=0 mm; (b) A=0.25 mm; (c) A=0.5 mm; (d) A=0.75 mm; (e) A=1 mm

图6 不同摆幅激光-CMT复合增材TC4成形

Fig. 6 Laser-CMT hybrid additive manufacturing of TC4 with different oscillation amplitudes

效果得到了大幅度改善。这表明摆动激光的引入能够有效改善电弧熔丝增材制造过程的稳定性。

图7为不同焊接电流下CMT增材TC4试样的截面形貌。图7a~7e焊接电流分别为120 A, 135 A, 150 A, 165 A, 180 A,可以观察到,微观组织均呈现出连续的 β 柱状晶外延生长形态,这些粗大的柱状晶沿着增材方向延伸贯穿了整个沉积层。这主要是因为熔池内的热量主要通过热传导的方式通过母材向外界散失^[16],导致熔池内部形成垂直于熔合线的温度梯度,晶粒沿着这一温度梯度方向优先生长。同时,由于母材未经充分预热,熔池边缘向外铺展时向母材散失大量热量,导致液态金属粘度增大而流动性降低^[17],造成了熔池润湿铺展程度的不足,使得润湿角 θ 接近于垂直形成窄而高的焊道。

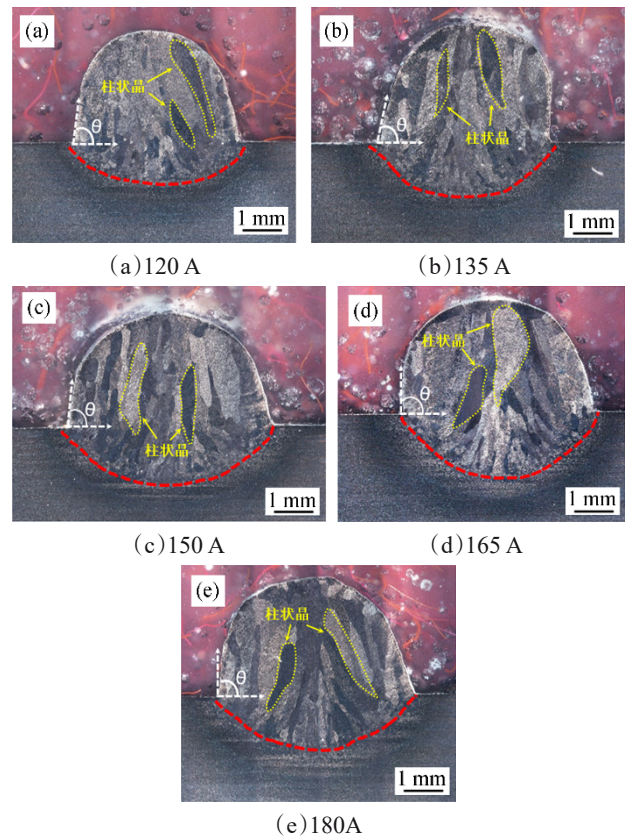


图7 不同焊接电流下CMT增材试样截面形貌

Fig7 Cross-sectional morphology of CMT additive samples under different welding currents

不同摆动幅度激光复合CMT增材TC4试样的截面形貌如图8所示。图8a~8e激光摆动幅度分别为0 mm, 0.25 mm, 0.5 mm, 0.75 mm, 1 mm,随着激光摆动幅度的增加,激光作用区域逐渐扩大,熔宽

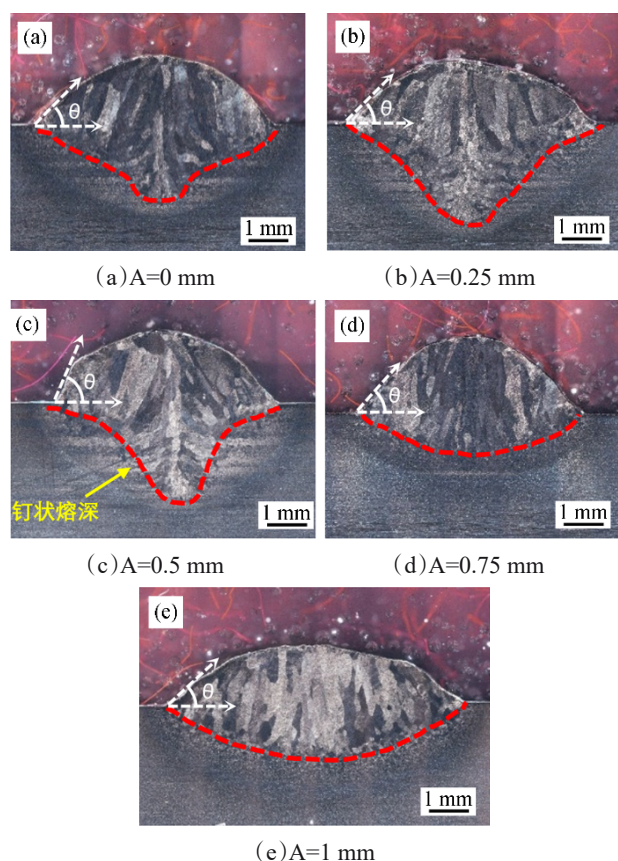


图8 不同摆幅激光-CMT复合增材TC4截面形貌

Fig. 8 Cross-section morphology of TC4 in Laser-CMT hybrid additive manufacturing with different oscillation amplitudes

从起初的3.52 mm增大到6.18 mm。焊缝熔深随着摆动幅度的增大呈现先增大后减小趋势。当激光摆动幅度达到0.5 mm时,熔深相较于激光无摆动时增大了25.8%,形成了较大的钉状熔深。然而,随着摆动幅度的进一步增大,由于能量逐渐分散,熔深逐渐减小,当激光摆动幅度到达1 mm时,熔深仅为最大值处的56.2%,此时熔深特征与CMT增材时相似。当激光的摆动幅度逐渐增大时,其对晶粒的细化效果会先增强后减弱,在摆动幅度达到0.5 mm时晶粒细化效果达到最佳,此时熔池内部出现横向生长且尺寸较小的晶粒。此外,由图8可以看出,添加摆动激光后润湿角明显减小。这是因为螺旋形摆动激光能够覆盖熔池边缘区域,增加对熔池的热输入,该部分能量有效补偿了熔池在向侧边缘铺展过程中通过母材热传导散失的热量,降低了熔池边缘金属的表面张力^[17],同时摆动激光会增强液态金属的流动性,从而促进了熔池向焊缝边缘的进一步铺

展,显著改善润湿性。

为进一步分析晶粒尺寸的差异,从图8进一步提取了晶粒的平均尺寸,结果如图9所示。可以发现,添加摆动激光后增材试样的平均晶粒尺寸相较于CMT增材试样平均晶粒尺寸明显下降,最大下降幅度达到了22.4%。且随着激光摆动幅度的增大,平均晶粒尺寸呈先减小后增大的趋势,在激光摆动幅度为0.5 mm时晶粒平均尺寸最小仅为0.83 mm。

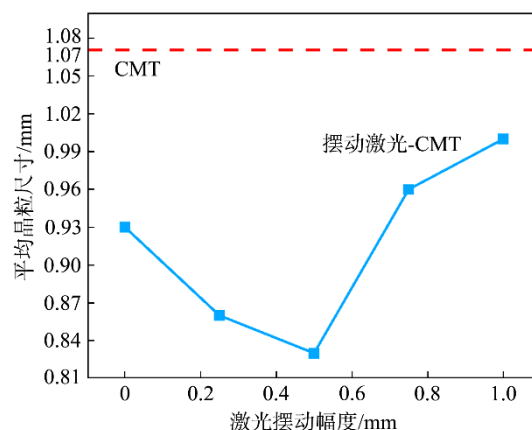


图9 不同工艺参数晶粒尺寸对比

Fig. 9 Comparison of grain sizes with different process parameters

电弧的稳定性和熔池行为是最终增材成形的关键影响因素,因此通过高速摄像对电弧和熔池动态行为进行观察,如图10所示。图10a为CMT增材过程的高速摄像结果,在 t_0 到 $t_0+23.2$ ms周期中电弧燃烧剧烈,电弧完整地出现在焊丝端部,呈圆锥状向下扩展。图10b为非摆动激光-电弧复合增材的高速摄像结果,由于激光的引导作用,电弧跳跃现象减少,增材过程更加稳定,这是由于电弧与激光发生耦合作用^[18],使电弧向激光束方向靠拢,热作用区集中在光丝间距中间位置,当电弧熄灭时,激光束仍然照射在熔池中,使熔池继续受热处于熔融状态,但此时激光的热作用区域有限。图10c为摆动激光-CMT复合增材制造过程高速摄像结果,可以看出激光摆动向靠近焊丝一侧时,光丝间距缩小,激光与电弧的耦合作用增强,摆动到熔池一侧时,激光对熔池的搅拌作用较常规激光增强,并且促进熔池流动,使得熔池的润湿铺展更均匀。

为了分析不同激光摆动幅度下对增材过程的熔深、稳定性和晶粒细化影响机理,对摆动激光作用下的激光能量分布状态进行分析,结合 Mahrle等

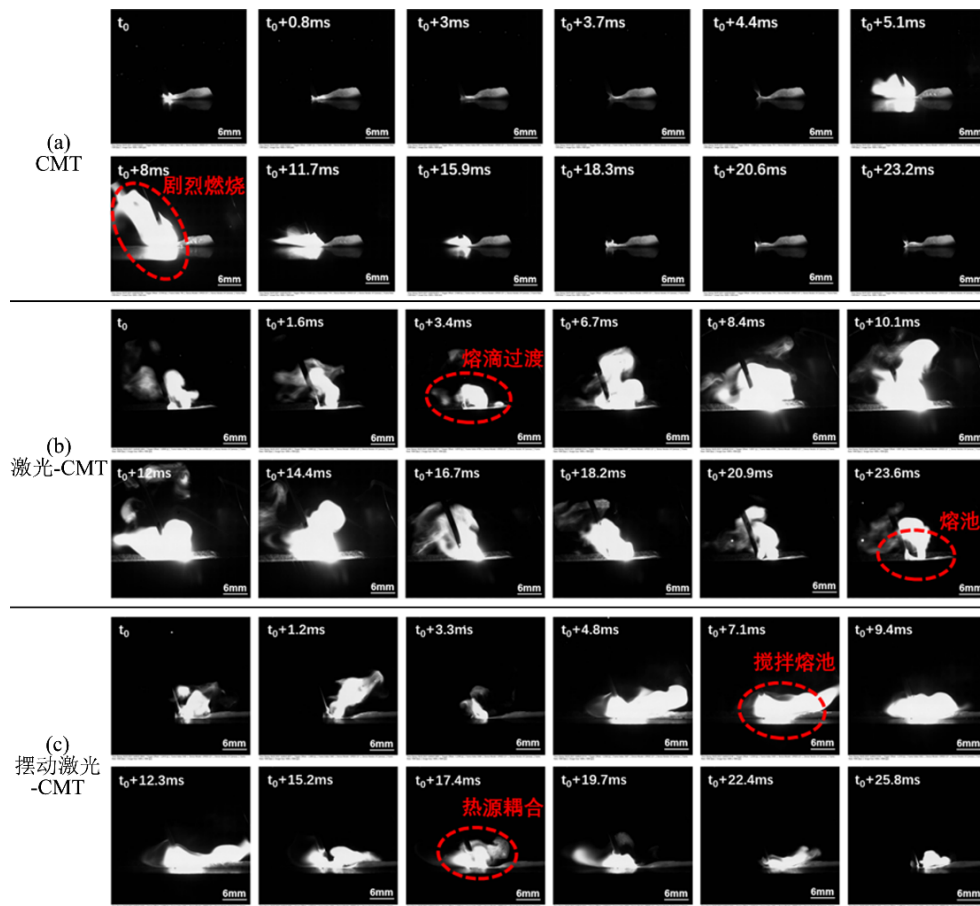


图 10 摆动激光对电弧及熔池行为的影响

Fig. 10 Effect of oscillating laser on arc and melt pool behavior

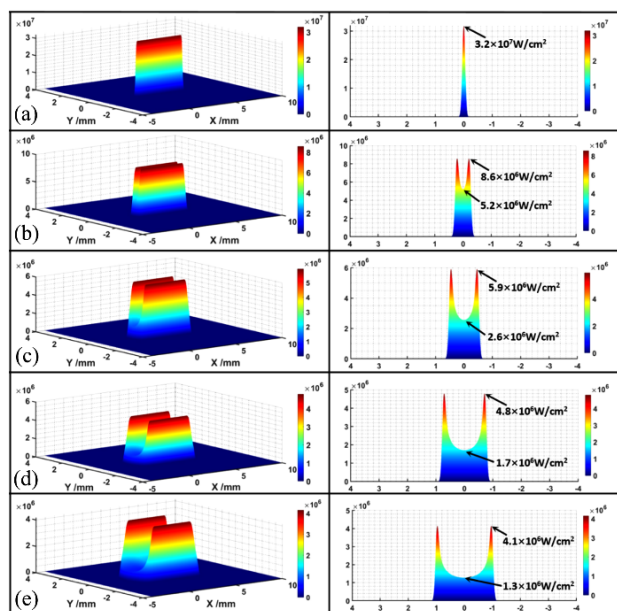
人^[19]提出的摆动激光能量沉积模型对激光能量密度积分数值运算,得到不同摆动幅度下激光能量沉积分布规律,结果如图 11 所示。图 11a~11e 分别为激光摆动幅度为 0 mm, 0.25 mm, 0.5 mm, 0.75 mm, 1 mm 时的激光能量沉积分布。可以看到,能量密度峰值均出现最大摆幅边缘处,摆动中心区域具有最小的能量密度,随着激光摆动幅度增大,能量密度峰值呈下降趋势,当激光摆动幅度为 1 mm 时能量密度峰值仅为无摆动时的 12.8%,导致激光熔透能力降低。通过分析摆动激光对能量分布的影响规律,发现与无摆动激光相比,激光摆动可以实现更均匀的能量分布,随着摆动幅度增大,平均能量密度急剧下降,这导致熔宽逐渐增大而熔深显著减小。

2.2 薄壁成形及组织性能探究

不同工艺参数下薄壁的宏观形貌如图 12 所示。图 12a 为 CMT 增材制造 TC4 合金试样,可以发现,由于严重的驼峰和不连续焊道,导致试样无法持续

增材成形。图 12b~12d 为激光摆动幅度为 0 mm、0.5 mm、1 mm 时复合电弧增材 TC4 合金的试样,与未添加摆动激光的增材样件相比成形显著改善。在激光摆动幅度为 0 mm 时,仍然存在较小的驼峰缺陷,成形质量较差,表明此时的熔池稳定性仍然较差。在激光摆动幅度为 0.5 mm 时,驼峰缺陷消失,试样表面光滑平整,成形效果最好,表明此时摆动激光和电弧耦合的效果最佳,熔池稳定性显著提升。而在摆动幅度进一步提高至 1 mm 时,局部侧壁出现严重起伏,层间波纹严重,侧壁粗糙度较大,表明熔池稳定性降低。

表面粗糙度是评估增材制造试样宏观成形质量的关键指标之一^[20],试样的表面越平滑,后续所需的机械加工时间和成本就越少,从而提高材料的利用率并进一步提升增材制造的整体效率。图 13 为不同摆动幅度的激光复合电弧增材 TC4 合金试样的横截面形貌,通过计算试样的材料利用率对表



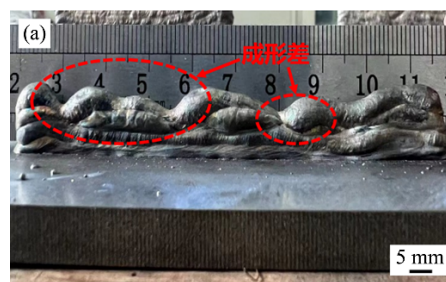
(a) $A=0$ mm; (b) $A=0.25$ mm; (c) $A=0.5$ mm; (d) $A=0.75$ mm; (e) $A=1$ mm

图 11 不同摆动幅度对能量分布影响规律

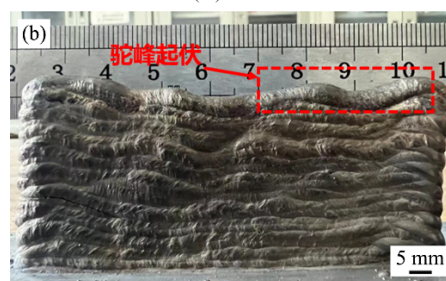
Fig. 11 Influence of different oscillation amplitudes on energy distribution

面粗糙度进行评估。当激光摆动幅度为 0 mm 时,平均材料利用率为 72.6%,当激光摆动幅度增大到 0.5 mm 时,平均材料利用率提升至 89.2%,当激光摆动幅度继续增大到 1 mm 时,平均材料利用率下降至 67.8%。结果表明随着摆动幅度的增大试样的表面粗糙度先升高后下降,在激光摆动幅度为 0.5 mm 时试样表面成形最好,这是因为此时熔池稳定性最好,摆动激光与电弧的耦合效果最佳,熔池金属实现良好的铺展润湿。

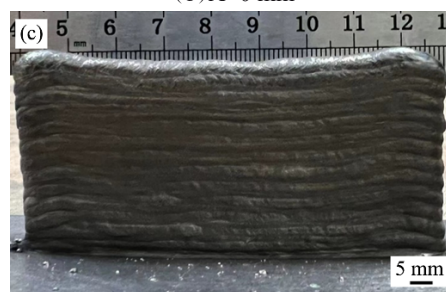
随后,对不同激光摆动幅度下 TC4 增材试样进行三组横向和纵向拉伸试验,结果如图 14 所示。增材试样的性能随激光摆动幅度的增大呈先增大后减小的趋势,当激光摆动幅度为 0.5 mm 时拉伸强度最高,横向拉伸强度达到了 814.74 MPa,纵向拉伸强度达到了 949.07 MPa,这是因为此时晶粒细化效果最佳,晶界密度的提升增大了位错运动的阻力,从而提升了试样的拉伸强度。此外,由于在 0 mm 和 1 mm 摆幅下试样内的 β 柱状晶较为粗大,墙体的力学性能各向异性严重,横向和纵向的抗拉强度差异达到 226 MPa,而 0.5 mm 摆幅下构件的各向异性由于柱状晶的细化而显著降低^[21-23],横向和纵向抗



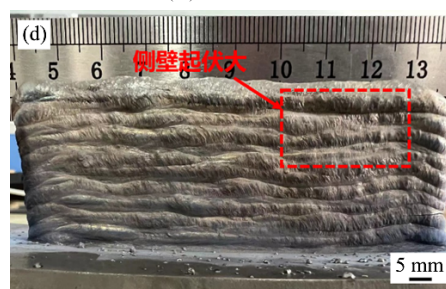
(a) CMT



(b) $A=0$ mm



(c) $A=0.5$ mm



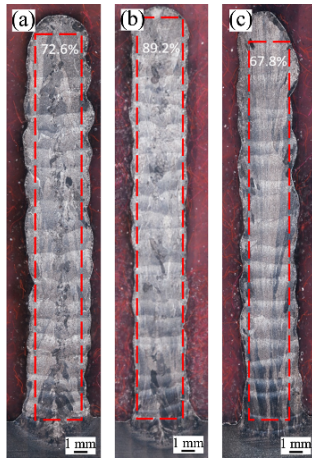
(d) $A=1$ mm

图 12 薄壁宏观形貌

Fig. 12 Thin-walled macroscopic topography

拉强度差异为 135 MPa。

为阐明性能强化机理,首先应对熔深影响机制进行分析。摆动激光稳定及熔深影响机制如图 15 所示。如图 15a 所示,当摆动幅度为 0 mm 时,非摆动激光能量集中作用于母材使其气化形成金属蒸汽喷出,金属蒸汽反冲压力作用于熔池形成深熔匙孔^[24],但较大的反冲压力使熔池剧烈波动,液态金属以一定的速度触及熔池边缘,熔池在表面张力的



(a) $A=0$ mm; (b) $A=0.5$ mm; (c) $A=1$ mm

图 13 不同激光摆动幅度下的薄壁截面形貌:

Fig. 13 Topography of thin-walled cross-sections with different laser oscillation amplitudes

作用下产生“回流”现象^[25],回流液态金属以一定的速度冲向匙孔,此时匙孔轮廓变得不规则内壁产生凸起,稳定性显著降低,最终匙孔坍塌形成较小的熔深。图 15b 中当增大摆动幅度至 0.25 mm、0.5 mm 时,前文提到,摆动激光使最大能量密度转变至摆

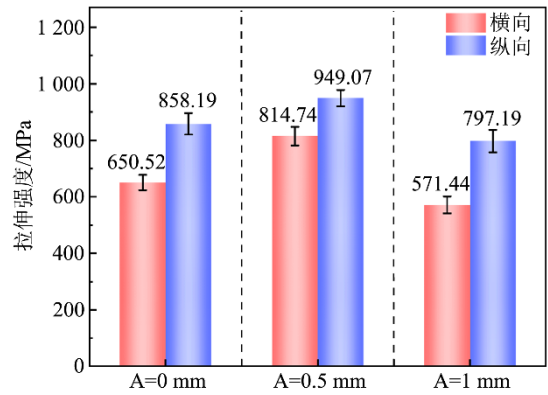
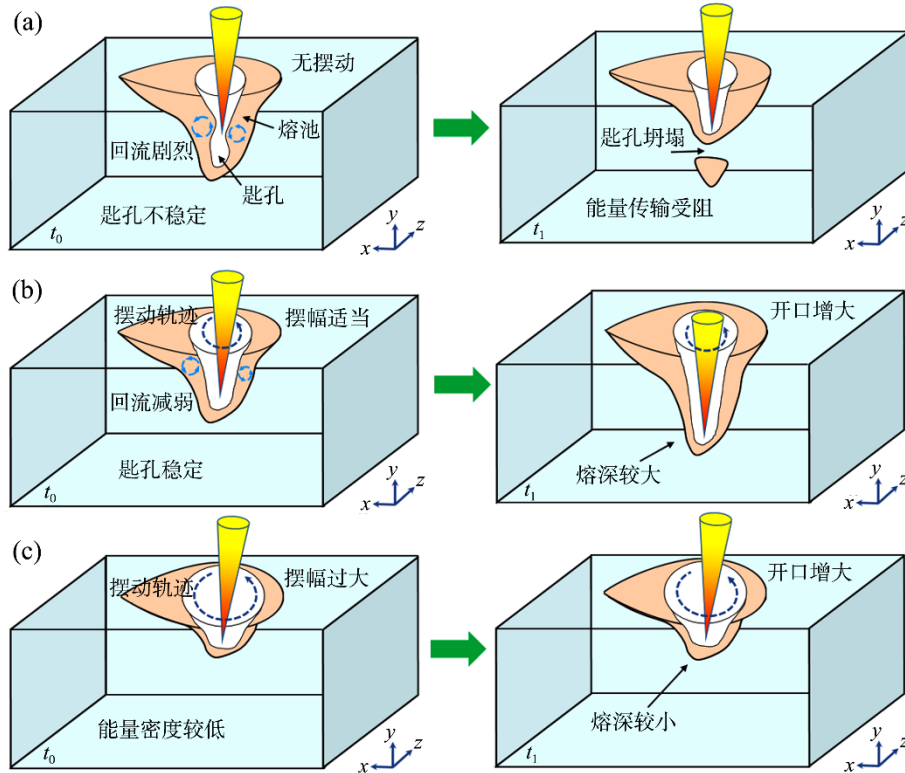


图 14 激光摆动幅度对拉伸强度的影响

Fig. 14 Effect of laser oscillation amplitude on tensile strength

动轨迹的边缘,而通过前人对激光焊接中匙孔的相关研究可知,匙孔的典型尺寸约为 0.75 mm^[26-27],而摆动幅度为 0.25 mm、0.5 mm 时,最大能量密度出现的位置与该匙孔特征尺寸相近,这有利于维持该尺寸区域范围内的匙孔稳定存在,从而保证了激光能量向熔池传输,增大了熔透能力。然而当激光的摆动幅度增大到 1 mm 时,一方面较大的匙孔开口及能量密度的显著衰减导致熔宽增大而熔深降低;另



(a) $A=0$ mm; (b) $A=0.5$ mm; (c) $A=1$ mm

图 15 摆动激光稳定增材过程示意

Fig. 15 Schematic diagram of the oscillating laser-stabilized additive process

一方面,摆动范围与匙孔特征尺寸存在较大差异,这使得深熔匙孔难以有效维持,进而导致熔透能力显著下降,因此,为了提高生产效率,应避免在实际生产中使用该工艺区间。

基于以上的熔深影响机制,可以得到如图16的晶粒细化机理示意图。未添加摆动激光及摆动幅度过大(1 mm)时晶粒的生长如图16a所示,此时熔池内部的温度梯度垂直于熔合线,导致晶粒垂直熔合线向上生长柱状晶 β 相。在多层堆积时,上一层垂直向上生长的晶粒,在下一层接近水平的温度梯度下,继续长大导致柱状晶尺寸的显著增大。这种粗大的纵向生长的柱状晶导致了横向拉伸时,沿粗大柱状晶发生开裂,降低横向拉伸试样的强度和塑性,使纵向拉伸试样的强度高于横向试样,各向异性较明显。图16b为添加摆动激光后晶粒生长示意图,钉状熔深的形成打乱了上一层晶粒的生长方向^[26-27],避免了原有的大尺寸晶粒的继续粗化,起到了晶粒细化的作用,此时,由于纵向生长的柱状晶受到明显细化,因此在横向试样的拉伸中,沿晶开裂受到有效抑制,试样的横向和纵向强度明显提高,各向异性降低;但随着激光摆动幅度的继续增大,能量密度低于维持钉状匙孔存在的临界值,导致失去晶粒细化的效果,粗大的纵向生长的柱状晶又导致了横向拉伸强度的降低和显著的各向异性。

因此,在相同的焊接热输入条件下,通过选择

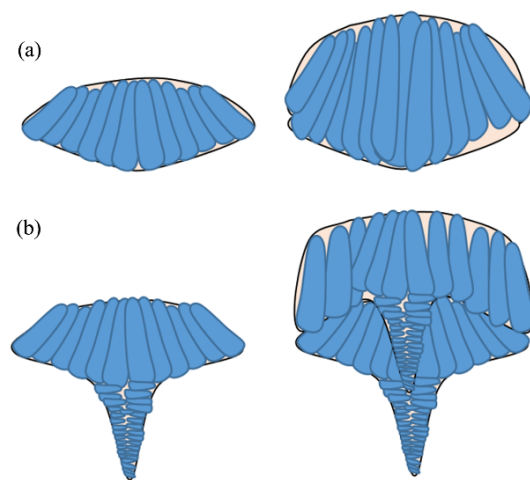


图16 晶粒细化机理

Fig. 16 Diagram of grain refinement mechanism

合适的摆动参数,显著改变原有的温度梯度以避免柱状晶粒在多层连续长大,可以在一定程度上实现对增材结构件力学性能的提升。

图17为不同激光摆动幅下TC4合金增材试样横向和纵向的拉伸断口扫描电子显微镜(SEM)图像。图17a~17c分别为激光摆动幅度为0 mm、0.5 mm、1 mm时的横向拉伸断口形貌,可以看出A=0 mm和A=1 mm时横向断口均存在明显的解理面,是典型的脆性解理断裂,对比之下可以发现A=0.5 mm时出现一定数量较浅的韧窝,说明此时的韧性有所增加,其断裂机制变为韧性-脆性混合断裂,这是因为此时粗大的柱状晶被显著细化,晶界密度增大,细

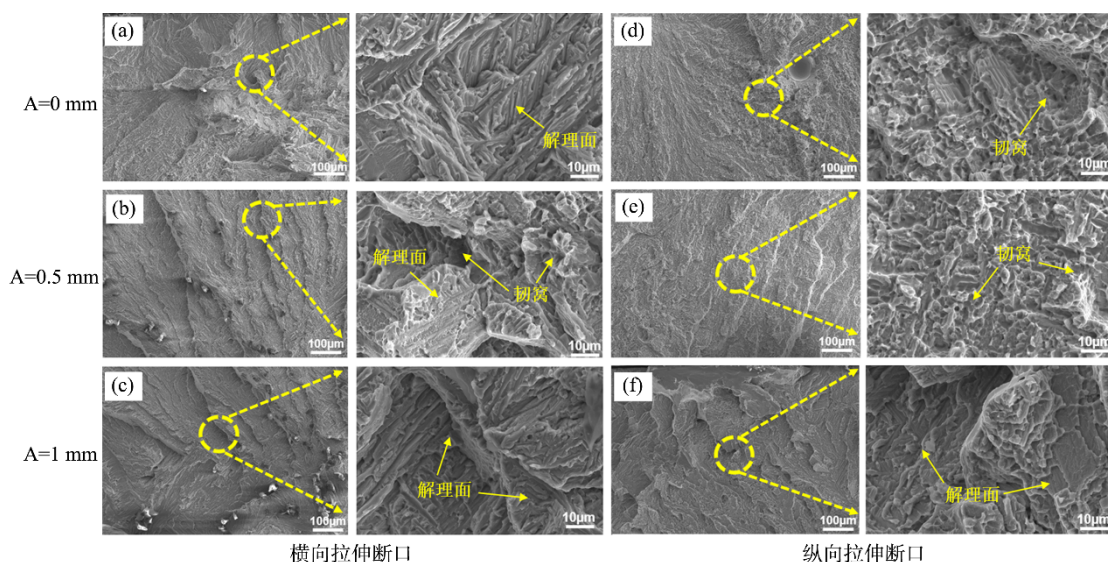


图17 不同摆幅试样拉伸断口SEM形貌

Fig. 17 SEM fracture morphology of tensile samples under different laser oscillation amplitudes

化的晶粒能够有效阻碍裂纹扩展。图 17d~17e 为纵向拉伸断口形貌,由图 17d 可以看到断口表面包含较多的韧窝,局部区域有拉伸变形迹象,说明在断裂前发生了一定的塑性变形,故该断口是韧性断裂。图 17e 断口中可以看到更多、更均匀分布的韧窝,且深度相较于 $A=0$ mm 时略有增加,说明裂纹在扩展过程中受到的阻碍增多,材料相较于 $A=0$ mm 时具有更好的韧性,分析其原因为 $A=0.5$ mm 条件下细晶强化效果最好。从图 17f 中可以观察到明显解理面,塑性变形区小,整体表现出典型的脆性断裂特征,表明材料的韧性较差,裂纹主要沿晶界或解理面传播,印证了上文提到的当 $A=1$ mm 时柱状晶粗大的现象。

3 结论

采用摆动幅度为 0.5 mm 的激光辅助电弧增材制造 TC4 实现了较好的高速熔丝增材成形,对比分析了摆动激光对薄壁成形,晶粒细化,拉伸强度,熔池和电弧行为的影响机制,得到的主要结论如下:

(1)在电弧增材制造 TC4 过程中引入摆动激光后,电弧的稳定性显著增加,熔池的流动性增强,对比发现当摆动幅度为 0.5 mm 时,驼峰缺陷显著改善,墙体粗糙度大幅减小。

(2)引入摆动激光能够形成钉状熔深,改变晶粒生长方向从而实现细化晶粒。与其他摆动幅度的激光-电弧复合增材工艺相比,当摆幅为 0.5 mm 时,钉状熔深的稳定性最佳,晶粒细化效果最显著,平均晶粒尺寸可降低 22.4%。

(3)与其他激光摆动幅度下制备的增材试样相比,当摆动幅度 0.5 mm 时拉伸性能最优,横向、纵向拉伸强度分别可以达到 814.74 MPa 和 949.07 MPa。

参考文献:

- [1] DONG Z, TIAN Y, ZHANG L, et al. Research status of high efficiency deep penetration welding of medium-thick plate titanium alloy: A review [J]. Defence Technology, 2025, 45: 178–202.
- [2] SINGLA A K, BANERJEE M, SHARMA A, et al. Selective laser melting of Ti6Al4V alloy: Process parameters, defects and post-treatments [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 161–187.
- [3] LIU S, SHIN Y C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review [J]. Materials & Design, 2019, 164: 107552.
- [4] 徐全斌, 刘诗园. 国外航空航天领域钛及钛合金牌号及应用 [J]. 世界有色金属, 2022(16): 96–99.
XU Q B, LIU S Y. Titanium and titanium alloy grades and applications in the aerospace field abroad [J]. World Nonferrous Metals, 2022(16): 96–99.
- [5] 黄健康, 吴昊盛, 于晓全, 等. 钛合金电弧增材制造工艺及微观组织调控的研究现状 [J]. 材料导报, 2023, 37(14): 101–106.
HUANG J K, WU H S, YU X Q, et al. Research status of titanium alloy arc additive manufacturing process and microstructure regulation [J]. Materials Review, 2023, 37(14): 101–106.
- [6] 康国坡, 朱强, 黄建民, 等. 电弧增材制造技术与应用分析 [J]. 中国设备工程, 2024(18): 231–233.
KANG G P, ZHU Q, HUANG J M, et al. Analysis of arc additive manufacturing technology and applications [J]. China Plant Engineering, 2024(18): 231–233.
- [7] QIAN L, MEI J, LIANG J, et al. Influence of position and laser power on thermal history and microstructure of direct laser fabricated Ti–6Al–4V samples [J]. Materials Science and Technology, 2005, 21(5): 597–605.
- [8] HOOPER P A. Melt pool temperature and cooling rates in laser powder bed fusion [J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 548–559.
- [9] BEESE A M, CARROLL B E. Review of mechanical properties of ti–6Al–4V made by laser-based additive manufacturing using powder feedstock [J]. JOM, 2016, 68(3): 724–734.
- [10] 张萌, 王颖, 马宗青, 等. 原位合金化调控电弧增材制造钛合金组织与性能研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(11): 1478–1488.
ZHANG M, WANG Y, MA Z Q, et al. Research progress on in-situ alloying regulation of microstructure and properties of titanium alloys in arc additive manufacturing [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2024, 44(11): 1478–1488.
- [11] 高震, 王颖, 杨蔚然, 等. 热输入对脉冲 TIG 电弧增材制造 Ti6Al4V 钛合金微观组织与力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(10): 3366–3381.
GAO Z, WANG Y, YANG W R, et al. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V titanium alloy in pulsed TIG arc additive

- manufacturing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(10): 3366–3381.
- [12] 许明方, 陈玉华, 邓怀波, 等. 超声辅助CMT电弧增材制造TC4钛合金微观组织和力学性能研究[J]. 精密成形工程, 2019, 11(5): 142–148.
- XU M F, CHEN Y H, DENG H B, et al. Study on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy in ultrasonic-assisted CMT arc additive manufacturing[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(5): 142–148.
- [13] TIAN X, ZHU Y, LIM C V S, et al. Isotropic and improved tensile properties of ti-6Al-4V achieved by in-situ rolling in direct energy deposition[J]. Additive Manufacturing, 2021, 46: 102151.
- [14] YANG H, CHENG Z, TAO X, et al. Characterization of low-power pulsed laser-induced single/double arc hybrid heat source bottoming welding of medium-thick plate titanium alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 181: 111623.
- [15] 符成学, 尹艳超, 雷小伟, 等. TC4钛合金激光同轴送丝增材制造组织和性能研究[J]. 电焊机, 2025, 55(02): 77–84.
- FU C X, YIN Y C, LEI X W, et al. Study on Microstructure and Properties of TC4 Titanium alloy by Laser Coaxial Wire Feeding Additive Manufacturing[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(2): 77–84.
- [16] 肖珺, 葛欣雨, 盖胜男, 等. 基于摆动激光扫描的GMAW焊缝成形调控[J]. 焊接学报, 2024, 45(4): 7–12+129.
- XIAO J, GE X Y, GAI S N, et al. Weld formation control of GMAW based on oscillating laser scanning[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(4): 7–12+129.
- [17] YU J, CAI C, XIE J, et al. Keyhole stability, arc behavior, and molten pool flow in narrow-gap oscillating laser-arc hybrid welding of titanium alloy[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 220: 124922.
- [18] MAHRLE A, BEYER E. Modeling and simulation of the energy deposition in laser beam welding with oscillatory beam deflection[C]//International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Laser Institute of America, 2007: 1805.
- [19] 朱忠良, 赵凯, 郭立杰, 等. 大型金属构件增材制造技术在航空航天制造中的应用及其发展趋势[J]. 电焊机, 2020, 50(1): 1–14.
- ZHU Z L, ZHAO K, GUO L J, et al. Application and development trends of additive manufacturing technology for large metal components in aerospace manufacturing[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(1): 1–14.
- [20] TODARO C J, EASTON M A, QIU D, et al. Grain structure control during metal 3D printing by high-intensity ultrasound[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 142.
- [21] BERMINGHAM M J, STJOHN D H, KRYNEN J, et al. Promoting the columnar to equiaxed transition and grain refinement of titanium alloys during additive manufacturing[J]. Acta Materialia, 2019, 168: 261–274.
- [22] 鲁涛, 敬石开, 聂靖轩, 等. 电弧增材制造钛合金成形工艺与过程控制[J]. 稀有金属, 2023, 47(5): 618–632.
- LU T, JING S K, NIE J X, et al. Forming process and process control of titanium alloys in arc additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47(5): 618–632.
- [23] 陈波, 孟正, 马程远, 等. 扫描振镜激光TC4钛合金焊接性能及熔池流动行为[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 438–450.
- CHEN B, MENG Z, MA C Y, et al. Welding performance and molten pool flow behavior of TC4 titanium alloy using scanning galvanometer laser[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(4): 438–450.
- [24] WU M, LUO Z, LI Y, et al. Effect of oscillation modes on weld formation and pores of laser welding in the horizontal position[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 158: 108801.
- [25] TAN C, DONG Y, SUN H, et al. Numerical study on weld pool behaviors and keyhole dynamics in magnetic-field-assisted laser-arc hybrid welding of aluminum alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 6446–6461.
- [26] LIU F, DONG Y, TAN Z, et al. Mechanism analysis on suppressing porosity in laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy via external magnetic field[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 101: 1124–1135.
- [27] SU R, LI H, CHEN H, et al. Stability analysis and porosity inhibition mechanism of oscillating laser-arc hybrid welding process for medium-thick plate TC4 titanium alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 174: 110569.