

脉冲 TIG 增材制造技术研究进展

Progress in Additive Manufacturing Technique Based on Pulsed TIG

郭龙龙, 贺雨田, 鞠录岩, 吴泽兵, 张 勇, 吕澜涛, 王文娟
(西安石油大学 机械工程学院, 西安 710065)

GUO Long-long, HE Yu-tian, JU Lu-yan, WU Ze-bing,
ZHANG Yong, LYU Lan-tao, WANG Wen-juan
(Mechanical Engineering College, Xi'an Shiyou
University, Xi'an 710065, China)

摘要: 脉冲 TIG (pulsed tungsten inert gas, PTIG) 增材制造技术属于电弧增材制造技术的分支, 其最显著的优势是成本低、沉积率和材料利用率高, 适用于大尺寸结构件的制造。本工作从实验研究和数值模拟的角度, 着重介绍了 PTIG 增材制造成形件成形质量控制、微观组织及性能控制方面的研究成果, 总结了当前研究存在的不足。基于对成形件成形质量、微观组织及性能的准确预测和主动控制, 提出了 PTIG 增材制造技术有待深入的研究方向, 即: 工艺因素对成形质量的影响机理研究、缺陷形成机制及其抑制措施研究、熔池微观组织演变数值模拟研究、成形件内应力和变形的调控机制研究、微观组织与力学性能关系模型的建立。

关键词: 脉冲 TIG; 增材制造; 成形质量; 微观组织; 力学性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2018.000267

中图分类号: TG142 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2018)12-0010-08

Abstract: Additive manufacturing based on PTIG (pulsed tungsten inert gas, PTIG) is a branch of arc additive manufacturing technique. Its notable advantages are low cost, high deposition rate, high material utilization ratio, and suitable for manufacturing parts of large size. In this paper, the research results on the control of formation quality, microstructure and properties of the parts deposited by PTIG additive manufacturing were emphasized in view of experimental research and numerical simulation. Meanwhile, the shortcomings of current investigations were also summarized. Based on accurate prediction and accurate control on the formation quality, microstructure and properties, the research directions for further study on PTIG additive manufacturing technique in the future were put forward, including the influence mechanism of process factors on the formation quality, defects forming mechanism and the suppression measures, numerical simulation on microstructure evolution in molten pool, formation and regulation mechanisms on internal stress and deformation, and the establishment on quantitative relationship model between the microstructure and mechanical properties.

Key words: pulsed TIG; additive manufacturing; formation quality; microstructure; mechanical property

增材制造技术基于“离散-堆积”原理, 以粉末或丝材为填充材料, 利用数字化技术控制高能束将填充材料熔化, 依据三维 CAD 模型数据制造实体产品^[1-3]。与传统的“减材制造”技术相比, 增材制造技术能够实现高性能, 复杂结构金属件的快速、无模具、致密、近净成形, 而且材料利用率高^[2]。因此自 20 世纪 80 年代以来, 增材制造技术始终是国际材料加工工程与先进制造技术学科交叉领域的研究热点, 我国政府和相关部门也对增材制造技术高度重视, 在“中国制造 2025”

中将其列为未来大力扶持与重点发展的技术^[4-5]。

脉冲 TIG (pulsed tungsten inert gas, PTIG) 增材制造属于电弧增材制造技术的重要分支, 其以周期性变化的电弧为热源, 以氩气等惰性气体作保护, 填充焊丝以熔滴的方式逐滴、逐层沉积, 从而获得近净成形的制造件^[6-7]。与激光增材制造、电子束增材制造等技术相比, PTIG 增材制造技术最显著的优势是成本低、沉积率和材料利用率高, 适用于大尺寸、复杂结构件的制造^[8-9]。因此, PTIG 增材制造技术在航空航天、飞机、

汽车、核电等领域的零部件制造方面有着良好的应用前景^[10-12]。

目前,PTIG 增材制造技术已被用于各种材料的增材制造,如 AZ31 镁合金^[10]、镍基合金^[12]、Ti-6Al-4V 钛合金^[11,13-14]、HSLA 钢^[15]、铝合金^[16]等,并成功制备出具有较好成形质量和力学性能的单道多层薄壁件^[10,13]、薄壁圆筒件^[16-17]和矩形薄壁件^[11]等简单结构成形件。由于 PTIG 增材制造技术涉及的工艺参数较多,加之焊丝以高温熔滴逐点、逐层沉积的特殊性,导致 PTIG 增材制造的工艺控制更加复杂。因此,国内外学者围绕 PTIG 增材制造的过程控制展开了相关研究,研究热点包括:不同材料 PTIG 增材制造的可行性、成形件缺陷形成机制及调控方法、工艺参数对成形质量的影响、工艺参数对微观组织的影响、成形件应力与变形调控、工艺参数对力学性能的影响。总体来看,国内外关于 PTIG 增材制造技术的研究及应用仍处于起步阶段,工艺因素对 PTIG 增材制造成形件成形质量、微观组织及性能的影响机理还不是很清楚。因此,成形质量控制、微观组织及性能控制将仍是研究的热点,也是亟待解决的关键科学问题。

本文从实验研究和数值模拟的角度,着重介绍了 PTIG 增材制造成形件成形质量、微观组织及性能控制方面的研究进展,总结、归纳了目前研究存在的不足,提出了未来需要深入研究的方向。

1 成形质量控制研究

PTIG 增材制造的填充材料以高温熔滴的方式逐滴、逐层沉积,因此成形件的成形质量,如尺寸精度、表面平整度等,是衡量制造方案是否合理、有效的关键指标^[11]。然而,在 PTIG 增材制造过程中,工艺参数、预热温度和搭接率等因素均会对熔滴的过渡行为、熔池的动力学行为、熔池的传热过程和形态产生显著影响,从而影响所得焊道的成形质量^[18]。此外,相邻焊道的搭接情况影响所得沉积层的表面平整度,先前沉积层的成形情况又直接影响后续的堆积层^[19]。因此,焊道和沉积层的成形质量对最终所得成形件的成形质量至关重要^[20]。因此,非常有必要探讨工艺因素对成形件成形质量的影响规律,为成形质量的准确预测、主动控制提供一定的理论基础和实验参考。

国内外学者已围绕 PTIG 增材制造成形件的成形质量及其影响因素展开了研究,相关研究主要包括两方面:一方面,采用实验的方法直接研究成形件的宏观形貌,分析工艺因素变化对沉积层成形质量的影响规律;另一方面,采用数值模拟的方法从流体动力学角度

揭示熔池流动对沉积层成形质量的影响机理。

1.1 实验研究

目前,已有学者通过实验,从宏观形貌的角度探讨了工艺参数对成形件成形质量的影响规律。如,Chen 等^[21]基于多传感器融合技术,提取 PTIG 焊道沉积过程中的电信号和图像信息,并以获取的信息作为输入变量,建立熔池几何参数的神经网络预测模型,结果表明:所提出的方法是可行的,其能够准确预测熔池的几何参数;Lothongkum 等^[22]研究了 PTIG 工艺参数对单道沉积层成形质量的影响,研究指出:增加氩气中氮气的含量会导致焊接电流降低,焊道的深宽比随扫描速率的增加而增大;Chen 等^[23]借助传感器提取 PTIG 焊接电流、电压和熔池图像等信息,综合运用 B-P 神经网络和 D-S 证据理论算法处理信息,预测了焊道的熔合情况,研究表明:所建立模型的最高预测精度为 72.2%,精度较差的主要原因是信号处理算法不够精确;Wang 等^[24]研究了 PTIG 焊接电流、焊接速率和送丝速率对 4043 铝合金沉积层高度、宽度的影响规律,获得了无可见缺陷的 4043 铝合金空心圆柱件,其表面波纹度小于 0.05;Madadi 等^[25]借助中心复合实验设计方法获取样本,利用响应面法建立了 PTIG 工艺参数,包括基值电流、峰值电流、基值时间、占空比和频率,与单焊道成形质量的回归模型,结果表明:所考察的工艺参数对单焊道的成形质量具有显著影响,电流是影响热输入和熔合率的主要参数,熔合率随电流的增加而升高。

此外,Qi 等^[26]探讨了 PTIG 电弧行为对单焊道成形尺寸的影响,研究指出:随着脉冲频率的增加,电弧电压、电弧力和电弧刚度增加、电弧收缩效应也逐渐显著,电弧力增大促使熔深增加,而电弧收缩则导致熔宽减小;李玉龙等^[27]分析了 PTIG 脉冲频率对焊道成形的影响规律,结果表明:脉冲频率对电弧特性和熔池流动行为有显著影响,频率变化会导致熔宽、熔深和熔透率发生变化;Ghosh 等^[15]维持热输入不变,着重探讨了脉冲因子变化对单焊道成形质量的影响,研究指出:因子 ϕ 变化对熔池的熔深、熔宽及传热行为有显著影响;Guo 等^[28-29]建立了 PTIG 工艺参数与 Inconel 625 单焊道成形质量的回归模型,揭示了工艺参数主效应、交互效应对焊道成形质量的影响规律,实验表明:所建立模型可用于成形质量的预测。

以上关于成形质量的实验研究主要针对单层单道成形件,也有少量学者针对单道多层、多道多层成形件的 PTIG 增材制造进行了研究。如,Ouyang 等^[16]利用 PTIG 增材制造 5356 铝合金薄壁件,通过预热基材、监控电弧长度和调控焊接电流改善了沉积条件、降

低了成形件的变形,并揭示了工艺参数对沉积层宽度和厚度的影响规律,结果表明:可利用 PTIG 增材制造具有较高成形质量的 5356 铝合金件;Katou 等^[17]利用 PTIG 增材制造 Ti 合金件,研究了工艺参数对成形质量的影响规律,并成功制备了 Ti 合金成形件(见图 1),研究指出:随着峰值电流的增加,焊道的倾角和高度逐渐减小,熔宽逐渐增加,成形件中未发现气孔、裂纹等缺陷,而且微观组织比较均匀。

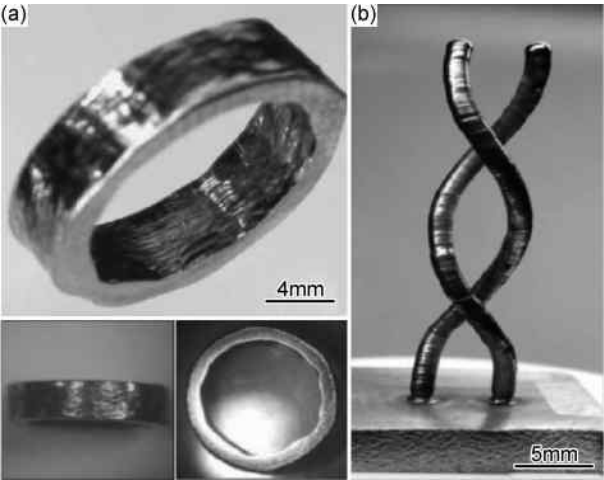


图 1 PTIG 增材制造件^[17] (a)环状结构;(b)双螺旋结构
Fig. 1 Parts manufactured by PTIG^[17]
(a)ring structure;(b)double helix pin structure

金件,得到了不同频率条件下单道多层薄壁成形件的宏观形貌(见图 2),研究指出:脉冲频率对成形件的宏观形貌有显著影响,在频率为 5Hz 和 10Hz 时,熔池发生了共振,因此宏观成形质量较差;孙红叶等^[30]利用 PTIG 进行 Al-6.3Cu 合金的电弧填丝增材制造,着重探讨了焊接速率和送丝速率对成形件层高和层宽的影响,研究表明:改变送丝速率和焊接速率可有效地调节成形件的层高和层宽;黄丹等^[31]探讨了预热温度和峰值电流对 PTIG 增材制造 5A06 铝合金成形质量的影响,建立了单层单道基板预热温度和带判据的电弧峰值电流工艺规范,研究指出:成形件的层高自第一层起急剧下降,直到第八层后层高基本趋于稳定。同时,上述关于多焊道的 PTIG 增材制造实验研究一致认为:PTIG 增材制造技术具有良好的工程应用前景。

尽管,国内外学者已围绕 PTIG 增材制造件的成形质量控制展开了相关实验研究,然而研究仍存在不足:

- (1) 研究重点在于简单结构成形件增材制造的可行性实验验证,针对复杂结构成形件的研究比较罕见;
- (2) 关于焊道宏观形貌及影响因素的研究,仅考虑了个别工艺参数,而且工艺参数主要是根据经验选取,缺乏理论基础和实验依据;
- (3) 关于多道沉积层的研究,工艺参数对成形件宏观形貌影响机理的系统研究较少,尚未建立工艺参数对成形质量影响规律的定量描述模型。

此外, Guo 等^[10]利用 PTIG 增材制造 AZ31 镁合

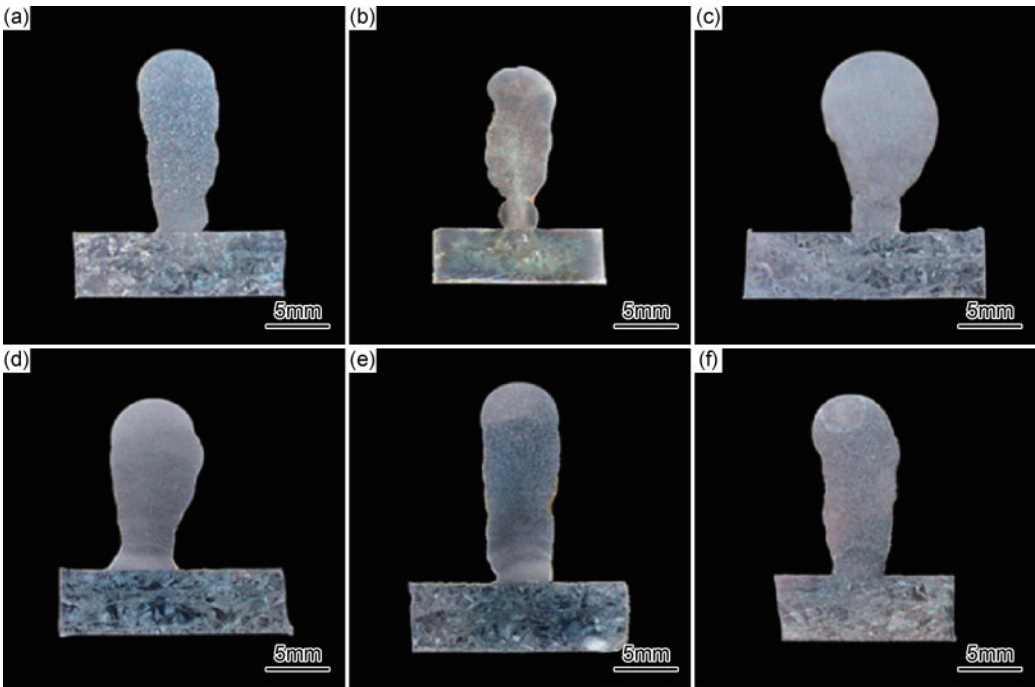


图 2 AZ31 薄壁件横截面形貌^[10] (a)500Hz;(b)100Hz;(c)10Hz;(d)5Hz;(e)2Hz;(f)1Hz
Fig. 2 Cross section morphologies of thin-walled AZ31 parts^[10] (a)500Hz;(b)100Hz;(c)10Hz;(d)5Hz;(e)2Hz;(f)1Hz

1.2 数值模拟研究

由于难以利用实验准确地表征熔池的温度分布和流动行为,因此部分学者尝试利用数值模拟的方法对熔池的传热和传质行为进行研究。如, Kim 等^[32]分析了电磁力、表面张力、浮力和等离子弧力对熔池流动行为的影响,研究指出:增加脉冲时间比可增加熔深,但当脉冲时间比较小时熔深变化不明显;武传松等^[33]探讨了脉冲电流对 TIG 熔池流场、温度场和几何形状的影响规律,研究表明:熔池形状对电流的脉冲作用比较敏感,熔池流动的主要驱动力是表面张力梯度,而且其流场随电流作周期性变化;Lu 等^[34]研究指出:电弧温度分布决定电流密度分布和熔池形状,表面张力梯度是决定熔池形状的主要因素;杨明轩等^[35]研究指出:高频脉冲电弧对熔池液态金属的热、力作用显著,熔池表面流体在表面张力的驱动下由熔池中心流向边缘,最大流动速度出现在熔池边缘。上述学者建立的 PTIG 熔池流动数值模型均是二维的,而且假设熔池表面为平面,没有考虑熔池表面的变形。事实上,熔池表面的变形会影响电弧、热、力在熔池表面及其内部的分布,从而影响熔池的流动行为、传热过程和几何形态,最终影响沉积层的成形情况^[36]。

随后,研究者松弛了熔池表面为平面的假设,在考虑熔池表面变形的基础上作了进一步研究。如, Traidia 等^[37]探讨了工艺参数对熔池形状的影响; Roger 等^[38]研究了 PTIG 电弧与熔池的耦合作用,研究指出: Marangoni 对流是熔池流动的主要驱动力,在电流平均值相同的条件下, PTIG 与 TIG 熔池形状完全不同; Yang 等^[39]模拟了熔池的瞬态行为,结果表明:电弧的压缩效应会促使熔深增加,而且在电磁力和表面张力共同作用下熔池中存在双环流。

上述学者采用的都是二维数值模型,随后学者尝试建立三维数值模型进行研究。如,高如超等^[40]建立三维瞬态模型,研究了 PTIG 熔池行为及其对焊缝成形的影响,结果表明:电流方式对熔池流动行为和焊缝形状有明显影响,脉冲电流促使焊缝表面形成焊波,焊波间距和高度随脉冲频率的增加而减小,在连续电流作用下焊缝表面是连续的;Liu 等^[41]基于三维瞬态数值模型,研究了 PTIG 工艺参数对熔池流动行为和焊波形成的影响,研究指出:脉冲电流和熔池凝固诱导熔池上下流动,从而形成了表面波纹,随峰值电流的增加波纹厚度逐渐增厚,随着脉冲频率的升高波纹间距减小。以上关于 PTIG 增材制造熔池的数值模拟研究忽略了熔滴的影响,然而熔滴具有一定的速度、温度和质量,会对熔池表面造成冲击,并影响熔池的动量、能量和质量传输。因此,上述模型无法反映熔滴对熔池流

动行为的影响,也无法准确地表征熔池的流动、传热和传质行为。

综上所述,现有针对 PTIG 熔池力学行为的数值模拟研究仍存在不足:

(1) 研究主要针对单层单道成形件的熔池流动行为及影响因素,鲜有关于多道、多层和多道多层增材制造的研究;

(2) 将沉积层简化为连续、均匀的介质,忽略了熔滴质量、动量和能量对熔池流动行为、传热过程和几何形态的影响。

2 微观组织及性能控制研究

增材制造所得成形件不仅要满足尺寸精度和表面平整度要求,而且要满足性能要求。然而,增材制造熔池液态金属的动力学行为、晶体的形核和长大过程均影响沉积层的微观组织特征^[11];同时,在逐点、逐层沉积过程中,已沉积材料经历的多周期、复杂热作用会诱使微观组织发生复杂的演变,导致成形件的微观组织和力学性能呈现显著的各向异性^[16];此外,不均匀的加热和冷却导致成形件中存在复杂的内应力,过大的内应力会引起成形件严重变形,促使裂纹等缺陷的形成,继而影响成形件的尺寸稳定性和承载性能^[42]。因此,有必要围绕 PTIG 增材制造成形件微观组织及性能的调控机理和方法展开相关研究。

目前,国内外学者已围绕成形件的微观组织及性能控制展开了实验和数值模拟两方面的研究,并取得了一定的成果。

2.1 实验研究

关于 PTIG 增材制造成形件微观组织及性能的实验研究仍处于探讨阶段,研究主要针对特定工艺参数所得的成形件,缺乏工艺参数对成形件微观组织及性能影响机理的系统研究。如, Wang 等^[24]分析了 PTIG 增材制造 4043 铝合金空心圆柱件的微观组织特征,结果表明:成形件的底部和中部是胞状晶、柱状晶,顶部为较细密的树枝晶,侧面则是细小的等轴晶;Ouyang 等^[16]研究了 PTIG 增材制造 5356 铝合金薄壁件的微观组织,结果表明:微观组织的形态与其在沉积层中的位置密切相关,沉积层顶部以等轴晶为主,中部主要是较细密的等轴晶,层间熔合区为粗大的柱状晶;Horii 等^[43]利用 PTIG 增材制造技术制备了 Inconel 600 成形件,结果表明:成形件的沉积层间熔合良好,微观组织致密、无气孔和夹渣等缺陷,成形件的抗拉强度为 690 MPa,伸长率为 43%,均优于 JIS G4902 标准所规定 Inconel 600 的力学性能指标;

Wang 等^[13]探讨了 PTIG 增材制造 Ti-6Al-4V 薄壁件的可行性,分析了成形件的微观组织演变和力学性能,结果表明:成形件的微观组织呈外延生长的柱状晶,且其强度和延展性呈现显著的各向异性,平均屈服强度和抗拉强度分别为 803MPa 和 918MPa,与锻造 Ti-6Al-4V 相比,成形件的强度较低,但是疲劳寿命较高;黄丹等^[31]研究指出:PTIG 增材制造 5A06 铝合金件的微观组织不均匀,层内为细小的树枝晶和等轴晶,层间结合处为粗大的柱状晶,顶部为细小的树枝晶和等轴晶,成形件的抗拉强度与退火状态的 5A06 铝合金比较接近。

此外,部分学者尝试探讨了 PTIG 工艺因素对成形件微观组织及性能的影响规律。如,Ayarkwa 等^[44]研究了 PTIG 占空比对 5556 铝合金增材制造件微观组织和力学性能的影响,研究指出:随着占空比的增加,晶粒尺寸增加;但占空比对成形件的力学性能影响不明显,成形件的屈服强度和抗拉强度分别为 250MPa 和 300MPa。Wu 等^[11]研究了 PTIG 占空比、基值电流对 Ti-6Al-4V 成形件微观组织和力学性能的影响规律,研究指出:成形件的宏观形貌主要取决于热输入;降低热输入对于细化 β 相作用不明显,但有利于改善成形件的屈服强度和抗拉强度;其屈服强度为 891~931MPa,抗拉强度为 963~1008MPa,与锻态 Ti-6Al-4V 的力学性能相近。张晓鸿等^[12]探讨了 PTIG 脉冲频率、峰值电流、占空比和基值电流对 Inconel 690 单道沉积层微观组织的影响,研究指出:PTIG 工艺参数对沉积层晶粒大小有显著影响,在合理的参数范围内,随着峰值电流、占空比和脉冲频率的增加,沉积层的晶粒明显细化;增大基值电流则不利于焊缝组织的细化。

综上所述,现有关于 PTIG 增材制造成形件微观组织及性能的实验研究仍存在不足:

- (1) 研究主要针对特定工艺条件增材制造所得的成形件,工艺因素对成形件微观组织及性能的影响机理尚不明确;
- (2) 成形件微观组织特征对力学性能的影响机理尚不明确,两者之间尚未建立起有效的数学模型;
- (3) 针对成形件内气孔等缺陷形成机制的研究较少,工艺因素对缺陷的影响规律尚不明确,缺乏抑制缺陷的有效措施。

2.2 数值模拟研究

PTIG 增材制造是电弧熔化金属材料形成熔池,实现填充材料和既有材料冶金结合的过程。为了获得组织均匀、残余拉应力和变形小的成形件,国内外学者开展了相关数值模拟研究。如,Zhao 等^[42]探讨了扫

描路径对单道多层增材制造件残余应力和变形的影响,研究指出:扫描路径对残余应力和变形有显著影响,末尾沉积层的残余应力明显较大,这主要是因为缺少后续沉积层的退火效应;Heigel 等^[45]研究了间隔时间和壁厚对成形件温度和残余应力的影响;赵慧慧^[46]着重研究了再制造过程中的应力和变形演变规律及其影响因素,并建立了多重堆积路径模糊综合评价系统,实现了多指标路径优化。上述数值模拟研究的重点均是应力场、变形的演变和分布,温度场分析仅仅是应力和变形分析的载荷,而且忽略了热输入的周期性变化。

通常,在合金成分既定的条件下,温度梯度(G)和结晶速率(R)是表征熔池温度场的两个关键参数,温度梯度和结晶速率的比值 G/R 决定微观组织的形态,两者的乘积 $G \times R$ 影响微观组织的尺寸^[47]。然而,仅少量学者综合考虑了 PTIG 增材制造工艺因素对温度场和残余应力场的影响。郭龙龙^[48]建立了 PTIG 多道多层沉积的三维热-力耦合有限元模型,分析了间隔时间、沉积路径对成形件残余应力的影响规律,优化了间隔时间和扫描路径。但是,该研究没有考虑热输入的周期性变化,并且没有考虑 PTIG 工艺参数变化对温度场和应力场的影响。

综上所述,现有关于 PTIG 增材制造过程的数值模拟研究仍存在不足:

- (1) 假设热输入是恒定的,忽略了热输入的周期性变化;
- (2) 研究的重点在于应力场,关于温度场对微观组织的影响重视不足;
- (3) 研究主要针对特定的工艺条件,工艺参数变化对温度场和应力场分布及演变的影响机理尚不明确;
- (4) 尚未建立温度场与微观组织的数值模型,无法根据温度场数据预测微观组织的演变及分布特征;
- (5) 尚未建立微观组织与力学性能关系的定量模型,无法预测成形件的力学性能。

3 PTIG 增材制造技术未来研究方向

为了获得具有良好成形质量和性能的成形件,亟须实现 PTIG 增材制造件成形质量、微观组织及性能的准确预测、主动控制。本文在综合分析国内外研究动态的基础上,就未来应解决的关键科学问题和研究方向给出如下建议:

- (1) 进行不同参数组合条件下的 PTIG 增材制造实验,分析工艺参数主效应、交互效应对成形件成形质量的影响规律;

(2) 结合成形件的几何形貌,建立涉及电弧、熔滴和熔池的多物理场强耦合数值模型,从动力学、传热和传质行为的角度揭示工艺因素对成形质量的影响机理;

(3) 考虑电流的脉冲变化,建立PTIG增材制造过程的热力耦合有限元模型,揭示缺陷产生机制、调控应力和变形,以减少缺陷产生;

(4) 建立熔池非平衡凝固过程的微观组织预测模型,揭示工艺因素对微观组织形貌、晶粒尺寸和分布的影响机理,并预测成形件的微观组织特征;

(5) 建立成形件微观组织与性能的定量描述模型,结合微观组织数值模拟结果,准确预测成形件的力学性能。

参考文献

- [1] 张安峰,李涤尘,梁少端,等. 高性能金属零件激光增材制造技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016(22): 16-22.
ZHANG A F, LI D C, LIANG S D, et al. Development of laser additive manufacturing of high-performance metal parts [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(22): 16-22.
- [2] 杨平华,高祥熙,梁菁,等. 金属增材制造技术发展动向及无损检测研究进展[J]. 材料工程, 2017, 45(9): 13-21.
YANG P H, GAO X X, LIANG J, et al. Development trend and NDT progress of metal additive manufacture technique[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(9): 13-21.
- [3] 闫文韬,钱亚,林峰. 选区熔化过程多尺度多物理场建模研究进展[J]. 航空制造技术, 2017(10): 50-58.
YAN W T, QIAN Y, LIN F. Research progress of multi-scale multi-physics modeling for selective melting process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(10): 50-58.
- [4] 王延庆,沈亮兴,吴海全. 3D打印材料应用和研究现状[J]. 航空材料学报, 2016, 36(4): 89-98.
WANG Y Q, SHEN J X, WU H Q. Application and research status of alternative materials for 3D-printing Technology[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(4): 89-98.
- [5] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造:若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690-2698.
WANG H M. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [6] DING J, COLEGROVE P, MEHNEN J, et al. Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer manufacturing process on large multi-layer parts[J]. Computational Materials Science, 2011, 50(12): 3315-3322.
- [7] 姚祥宏. 电弧增材高氮钢-316L 不锈钢成形异材交织结构[D]. 南京:南京理工大学, 2017.
YAO X H. Forming mix structure of high nitrogen steel and 316L stainless by wire arc additive manufacturing [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017.
- [8] 陈伟,陈玉华,毛育青. 铝合金增材制造技术研究进展[J]. 精密成形工程, 2017, 9(5): 214-219.
- CHEN W, CHEN Y H, MAO Y Q. Research progress in additive manufacturing technology of aluminum alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(5): 214-219.
- [9] 柏久阳,王计辉,林三宝,等. 电弧增材制造厚壁结构焊道间距计算策略[J]. 机械工程学报, 2016, 52(10): 97-102.
BAI J Y, WANG J H, LIN S B, et al. Model for multi-beads overlapping calculation in GTA-additive manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(10): 97-102.
- [10] GUO J, ZHOU Y, LIU C, et al. Wire arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy: grain refinement by adjusting pulse frequency[J]. Materials, 2016, 9(10): 823-836.
- [11] WU Q R, MA Z S, CHEN G S, et al. Obtaining fine microstructure and unsupported overhangs by low heat input pulse arc additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 27: 198-206.
- [12] 张晓鸿,马朋召,张康,等. 脉冲TIG焊接工艺参数对高温镍基合金焊缝组织的调控研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(2): 93-101.
ZHANG X H, MA P Z, ZHANG K, et al. Study on controlling of welding seam microstructure about nickel-based high-temperature alloy by pulse TIG welding process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(2): 93-101.
- [13] WANG F D, WILLIAMS S, COLEGROVE P, et al. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(2): 968-977.
- [14] WANG F, WILLIAMS S, RUSH M. Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti6Al4V alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57(5/8): 597-603.
- [15] GHOSH P K, KUMAR R. Surface modification of micro-alloyed high-strength low-alloy steel by controlled TIG arcing process[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(2): 831-842.
- [16] OUYANG J H, WANG H, KOVACEVIC R. Rapid prototyping of 5356-aluminum alloy based on variable polarity gas tungsten arc welding: process control and microstructure[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2002, 17(1): 103-124.
- [17] KATOU M, OH J, MIYAMOTO Y, et al. Freeform fabrication of titanium metal and intermetallic alloys by three-dimensional micro welding[J]. Materials & Design, 2007, 28(7): 2093-2098.
- [18] 陆善平,董文超,李殿中,等. 电弧特性及其对熔池形貌影响的数值模拟[J]. 物理学报, 2009, 58(13): 94-103.
LU S P, DONG W C, LI D Z, et al. Numerical simulation of arc properties and their effects on the weld shape[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(13): 94-103.
- [19] 周祥曼,张海鸥,王桂兰,等. 电弧增材成形中熔积层表面形貌对电弧形态影响的仿真[J]. 物理学报, 2016, 65(3): 331-342.
ZHOU X M, ZHANG H O, WANG G L, et al. Simulation of the influences of surface topography of deposited layer on arc shape and state in arc based additive forming[J]. Acta Physica

- Sinica, 2016, 65(3):331-342.
- [20] 熊俊. 多层单道 GMA 增材制造成形特性及熔敷尺寸控制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
- XIONG J. Forming characteristics in multi-layer single-bead GMA additive manufacturing and control for deposition dimension[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [21] CHEN B, WANG J, CHEN S. Modeling of pulsed GTAW based on multi-sensor fusion[J]. Sensor Review, 2009, 29(3): 223-232.
- [22] LOTHONGKUM G, VIYANIT E, BHANDHUBANYONG P. Study on the effects of pulsed TIG welding parameters on delta-ferrite content, shape factor and bead quality in orbital welding of AISI 316L stainless steel plate[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 110(2): 233-238.
- [23] CHEN B, WANG J, CHEN S. Prediction of pulsed GTAW penetration status based on BP neural network and D-S evidence theory information fusion[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 48(1/4): 83-94.
- [24] WANG H J, JIANG W H, OUYANG J H, et al. Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 148(1): 93-102.
- [25] MADADI F, ASHRAFIZADEH F, SHAMANIAN M. Optimization of pulsed TIG cladding process of stellite alloy on carbon steel using RSM[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 510(1): 71-77.
- [26] QI B J, YANG M X, CONG B Q, et al. The effect of arc behavior on weld geometry by high-frequency pulse GTAW process with 0Cr18Ni9Ti stainless steel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9/12): 1545-1553.
- [27] 李玉龙, 从保强, 齐铂金, 等. 不同脉冲频率条件下 2219-T87 高强铝合金焊缝成形行为[J]. 焊接学报, 2013, 34(12): 67-70.
- LI Y L, CONG B Q, QI B J, et al. Weld appearance of 2219-T87 high strength aluminum alloy at different pulse frequency [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(12): 67-70.
- [28] 徐小东, 李悦钦, 郭龙龙, 等. 热丝脉冲 TIG 工艺参数对焊缝成型质量影响研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(6): 60-65.
- XU X D, LI Y Q, GUO L L, et al. Effect of process parameters on formation quality of clads deposited by hot wire pulsed TIG [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 39(6): 60-65.
- [29] GUO L L, ZHENG H L, LIU S H, et al. Formation quality optimization and corrosion performance of Inconel 625 weld overlay using hot wire pulsed TIG[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(9): 2219-2226.
- [30] 孙红叶, 从保强, 苏勇, 等. Al-6.3Cu 铝合金电弧填丝增材制造成形与组织性能[J]. 航空制造技术, 2017(14): 72-76.
- SUN H Y, CONG B Q, SU Y, et al. Geometry, microstructure and properties of wire+Arc additive manufacturing Al-6.3Cu alloy deposits[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(14): 72-76.
- [31] 黄丹, 朱志华, 耿海滨, 等. 5A06 铝合金 TIG 丝材-电弧增材制造工艺[J]. 材料工程, 2017, 45(3): 66-72.
- HUANG D, ZHU Z H, GENG H B, et al. TIG wire and arc additive manufacturing of 5A06 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(3): 66-72.
- [32] KIM W H, NA S J. Heat and fluid flow in pulsed current GTA weld pool[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(21): 3213-3227.
- [33] 武传松, 郑炜, 吴林. 脉冲电流作用下 TIG 焊接熔池行为的数值模拟[J]. 金属学报, 1998, 34(4): 416-422.
- WU C S, ZHENG W, WU L. Numerical simulation of TIG weld pool behavior under the action of pulsed current[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1998, 34(4): 416-422.
- [34] LU F G, YAO S, LOU S N, et al. Modeling and finite element analysis on GTAW arc and weld pool[J]. Computational Materials Science, 2004, 29(3): 371-378.
- [35] 杨明轩, 杨舟, 从保强, 等. 超高频脉冲电弧焊接熔池金属流动行为[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(4): 589-593.
- YANG M X, YANG Z, CONG B Q, et al. Metal molten behavior with ultra high frequency pulsed arc welding[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(4): 589-593.
- [36] KIM W H, FAN H G, NA S J. A mathematical model of gas tungsten arc welding considering the cathode and the free surface of the weld pool[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1997, 28(4): 679-686.
- [37] TRAIDIA A, ROGER F, GUYOT E. Optimal parameters for pulsed gas tungsten arc welding in partially and fully penetrated weld pools[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2010, 49(7): 1197-1208.
- [38] ROGER F, TRAIDIA A. Numerical and experimental study of arc and weld pool behaviour for pulsed current GTA welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(9): 2163-2179.
- [39] YANG M, YANG Z, CONG B, et al. A study on the surface depression of the molten pool with pulsed welding[J]. Welding Journal, 2014, 93(8): 312-319.
- [40] 高如超, 饶政华, 李芸霄, 等. 脉冲 GTAW 熔池行为和焊缝成形的三维数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(11): 4712-4719.
- GAO R C, RAO Z H, LI Y X, et al. Three-dimensional modeling of weld pool dynamics and weld bead formation during pulsed GTAW[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(11): 4712-4719.
- [41] LIU J W, RAO Z H, LIAO S M, et al. Numerical investigation of weld pool behaviors and ripple formation for a moving GTA welding under pulsed currents[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 91: 990-1000.
- [42] ZHAO H H, ZHANG G J, YIN Z Q, et al. Three-dimensional finite element analysis of thermal stress in single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(1): 276-285.
- [43] HORII T, KIRIHARA S, MIYAMOTO Y. Freeform fabrication of superalloy objects by 3D micro welding[J]. Materials &

Design, 2009, 30(4): 1093-1097.

[44] AYARKWA K F, WILLIAMS S W, DING J. Assessing the effect of TIG alternating current time cycle on aluminium wire+ arc additive manufacture [J]. Additive Manufacturing, 2017, 18: 186-193.

[45] HEIGEL J C, MICHALERIS P, REUTZEL E W. Thermo-mechanical model development and validation of directed energy deposition additive manufacturing of Ti-6Al-4V [J]. Additive Manufacturing, 2015, 5: 9-19.

[46] 赵慧慧. GMAW 再制造多重堆积路径对质量影响及优化方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.

ZHAO H H. Path influence on quality and path optimization method in multiple deposition of GMAW remanufacturing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[47] 徐富家. Inconel625 合金等离子弧快速成形组织控制及工艺优化[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.

XU F J. Microstructure control and process optimization of Inconel 625 alloy fabricated by plasma arc rapid prototyping[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[48] 郭龙龙. 脉冲 TIG 堆焊 Inconel625 工艺及堆焊层组织性能研究[D]. 成都:西南石油大学, 2017.

GUO L L. Study on process, microstructure and performance of Inconel 625 cladding deposited using pulsed TIG[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.

基金项目:西安石油大学青年教师科研启动项目(0104-134010025)

收稿日期:2018-03-18;修订日期:2018-09-11

通讯作者:郭龙龙(1988—),男,讲师,博士,主要从事焊接、电弧增材制造、石油天然气装备表面改性等方面的研究,联系地址:陕西省西安市电子二路东段 18 号西安石油大学机械工程学院(710065),E-mail: llguo@xsyu.edu.cn

(本文责编:齐书涵)