

# 送丝方式对步进填丝双脉冲 TIG 电弧增材成形精度的影响

李璐鹏, 张刚, 朱珍文, 任自友, 石珂, 樊丁

(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, 兰州, 730050)

**摘要:** 针对电弧增材制造热质传输强耦合、成形尺寸精度低等共性关键问题, 提出一种步进填丝双脉冲钨极氩弧(tungsten inert gas, TIG)电弧增材制造方法。基于此方法建立增材成形试验系统, 开展系列变化参数的直壁墙增材工艺试验。利用同步采集的熔滴、熔池动态变化图像数据重点研究分析了送丝方式对焊丝熔化、熔滴过渡、熔池行为和成形尺寸精度的影响规律。结果表明, 前、后送丝方式下熔滴均以液桥过渡方式熔入到熔池; 相比前送丝增材过程, 后送丝方式下焊丝熔化效率和熔滴过渡频率明显增加, 熔滴尺寸变小, 熔池表面高度和宽度尺寸波动均减小; 高频脉冲电弧使熔池体积略微增加, 热稳定性明显增强, 直壁墙沉积件成形精度明显提高。

**创新点:** (1) 提出步进填丝双脉冲 TIG 电弧增材成形方法, 实现电弧增材热质传输过程的解耦。  
(2) 高频脉冲电流群仅熔化定量进给焊丝且使熔滴稳定过渡到熔池, 实现质量传输的精确控制。

**关键词:** 步进填丝双脉冲 TIG; 电弧增材制造; 熔滴过渡; 熔池行为; 成形精度

中图分类号: TG 444 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20211207004

## 0 序言

与激光、电子束增材制造相比, 电弧增材制造具有材料利用率高、成形速度快、成本低等优点<sup>[1-2]</sup>, 非常适合于大尺寸结构件的快速近净成形。然而, 以熔化极气体保护焊、钨极氩弧焊、等离子弧焊等焊接方法发展而来的电弧增材制造技术具有明显的不足之处, 主要体现在: ①电弧高热输入引起的严重热累积效应; ②电弧热平衡边界突变; ③电弧-熔池热质传输的强耦合作用。以上综合作用使增材熔池极易失去热力平衡导致成形过程稳定性变差, 成形表面变得粗糙不平以及产生较大的残余应力和组织各向异性<sup>[3]</sup>。这将直接影响其在工程中的一次性使用, 因此, 提高电弧增材成形精度

是实现成形件工程化应用的前提。

针对提高电弧增材成形精度, 纵观国内外现有文献报道, 主要包括: ①从电弧稳定性和热输入精确可控着手, 专家学者们采用多种改进型或新型热源来减少沉积热输入, 提高电弧稳定性及熔池动态平衡维持能力, 进而提高增材成形精度<sup>[4-6]</sup>; ②在电弧增材成形尺寸在线检测与闭环控制方面, 采用不同的传感器获得成形尺寸信息, 建立成形尺寸预测控制模型, 实现沉积层尺寸控制<sup>[7-10]</sup>。通过建立工艺参数与沉积层成形质量的关系模型, 模拟研究了工艺参数对增材过程应力场、温度场、流场等影响规律, 进而优化焊接工艺严格控制焊接参数提高成形精度<sup>[11-12]</sup>; ③采用机加工的增减材复合制造来保证电弧增材成形精度<sup>[13-14]</sup>。上述研究成果在一定程度上提高了成形件尺寸精度, 但始终没有解决电弧-熔池系统强耦合与成形精度间的矛盾。

为此提出一种步进填丝双脉冲 TIG 电弧增材制造方法, 利用高、低脉冲电流群波形匹配步进送丝波形实现电弧增材过程热质传输的解耦, 提高成形过程稳定性和成形精度。在阐述该方法的电弧增

收稿日期: 2021-12-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51905245); 甘肃省自然科学基金资助项目(20JR5RA455, 21JR7RA202); 甘肃省重点研发计划资助项目(20YF8GA054); 中科院“西部之光”青年学者人才项目; 陇原青年创新创业人才项目; 兰州理工大学红柳优秀青年人才扶持资助项目。

材成形原理基础上,重点研究分析了送丝方式对增材成形过程中焊丝熔化、熔滴过渡、熔池行为和成形尺寸精度的影响规律。

## 1 试验原理与系统

### 1.1 试验原理

图 1 为步进填丝双脉冲 TIG 电弧增材试验原理。在增材过程中,低脉冲电流群阶段内送丝机不送丝,电弧仅熔化母材形成一特定尺寸的熔池;高脉冲电流群阶段内开始送丝,电弧主要熔化定量焊丝形成熔滴,并使熔滴以更小尺寸、高频率快速过渡到熔池,完成一个高低脉冲电流群周期内的热质传输过程。随着工件移动,双脉冲电流群周期性重复作用于定步长送进的焊丝,实现连续的传质传热过程,最终形成直壁墙增材件。双脉冲电流波形与送丝波形的匹配设计有效的将常规熔化极气体保护焊或 TIG 填丝增材过程中的传质耦合传输进行

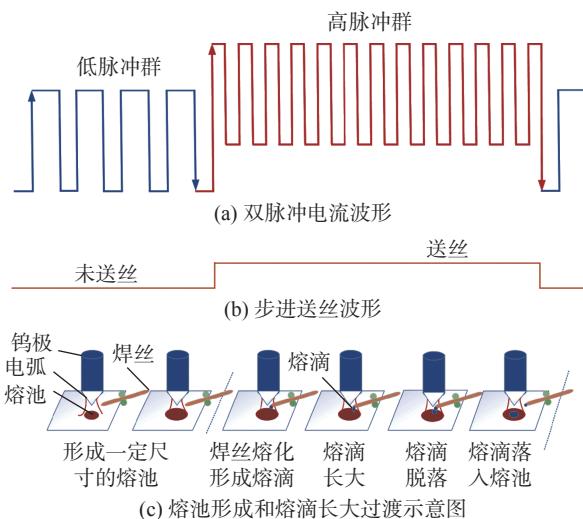


图 1 步进填丝双脉冲 TIG 电弧增材制造试验原理

Fig. 1 Principle of double-pulsed TIG additive manufacturing with stepped filling wire. (a) double pulsed current waveform; (b) stepper feed waveform; (c) schematic diagram of melt pool formation and drop growth transition

了解耦或弱化了热质传输的强耦合作用。为采用电弧热源实现增材成形精度的精确控制提供了可能。

### 1.2 试验系统

步进填丝双脉冲 TIG 电弧增材制造平台由焊接系统、送丝系统、视频采集系统和运动控制系统组成,如图 2 所示。

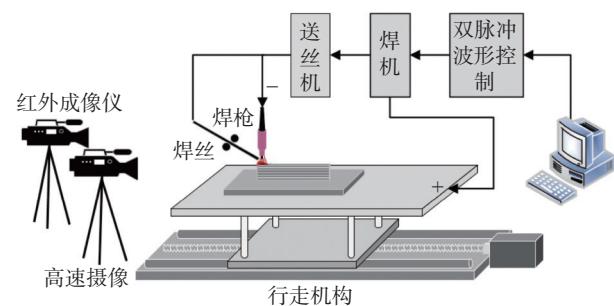


图 2 步进填丝双脉冲 TIG 电弧增材试验系统

Fig. 2 Experimental system of double-pulsed TIG additive manufacturing with stepped filling wire

焊接系统由 TIG 焊机和双脉冲波形控制系统组成。采用 LabView 软件平台设计了双脉冲电流波形并通过硬件连接实时发送到焊机中进行控制。TIG 焊机采用唐山松下产业机器有限公司的 TSP300 晶闸管型焊机,送丝机采用唐山松下产业机器有限公司的 YI-18TH 型高效数字填丝装置。视频采集系统由 Phantom VEO 340L 型高速摄像机、DIAS 短波红外成像仪以及镜头、滤光片等配件组成。运动控制系统由单轴滑台配合 UR-5 型机器人手臂组成,利用机器人手臂固定 TIG 焊枪,单轴滑台控制焊接方向。试验用基板为 100 mm × 60 mm × 12 mm 的 316L 奥氏体不锈钢板,焊丝采用直径为 1.0 mm 的 ER308 不锈钢焊丝。保护气体采用 99.999% 的高纯氩气,气体流量为 15 L/min。在图 2 所示的试验平台上采用表 1 参数进行多层单道直壁墙电弧增材制造试验,送丝方式采用前送丝和后送丝,钨针垂直于基板。红外热成像仪采样率为 60 帧/s,高速摄像采样率为 2000 帧/s。

表 1 沉积工艺参数

Table 1 Deposition process parameters

高脉冲群				低脉冲群				焊接速度 $v/(cm \cdot min^{-1})$	送丝速度 $v_s/(m \cdot min^{-1})$	送丝角度 $\alpha/(^{\circ})$	电弧长度 $l/mm$
峰值电流 $I_{hp}/A$	基值电流 $I_{hb}/A$	占空比 $\delta_h/(\%)$	频率 $f_h/Hz$	峰值电流 $I_{lp}/A$	基值电流 $I_{lb}/A$	占空比 $\delta_l/(\%)$	频率 $f_l/Hz$				
145	135	50	10	100	90	50	10	6	1	20	4

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 送丝方式对成形精度的影响

采用表1中沉积工艺参数在316L不锈钢平板试件上进行了直壁墙电弧增材制造试验。在沉积工艺参数不变的情况下,仅改变送丝方式获得的增材成形件形貌如图3所示。

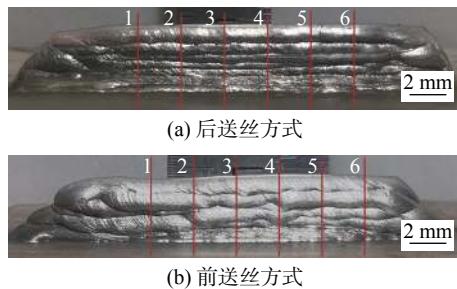


图3 不同送丝模式下成形件形貌

Fig. 3 Formation shape with different wire feed pattern.  
(a) rear wire feeding mode; (b) lead wire feeding mode

为了定量对比成形件在高度方向上的尺寸变化,采用图像处理的方法测量了图3中6条线所示的成形件沉积层的层高,并计算了每一层的层高平均值,测量结果如图4所示。

从图3的沉积层宏观形貌发现,前送丝方式下沉积层成形精度比较低,横向几何尺寸波动很大,熔池频繁出现失稳塌陷,出现阶梯状,上一沉积层对下一沉积层熔化量多,沉积件层高变化范围为0.74~1.17 mm;后送丝方式下沉积件阶梯状形貌

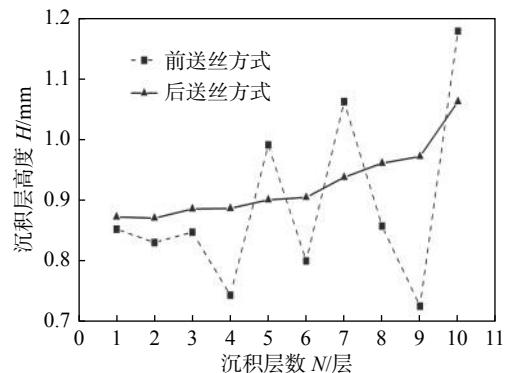


图4 沉积层高度

Fig. 4 Vertical height of deposited layers

明显改变,整体整形良好,且层高变化范围为0.87~1.06 mm,高度方向变化较平缓,前9层层高基本维持在0.90 mm附近,由此推断每一沉积过程中熔池稳定性得到良好控制、几何尺寸偏差较小。图4也显示出前送丝沉积层层高从下到上呈锯齿状突变,表明沉积过程熔池不稳定,出现熔池塌陷等缺陷。通过测量成形精度良好段(2~4号线)的沉积层宽度变化值发现,前送丝方式下宽度变化值在4~8 mm范围内,后送丝方式下宽度变化值在5~6 mm范围。为揭示不同送丝方式下沉积件成形精度的变化原因和优化控制工艺获得良好成形的直壁墙增材件,重点从熔滴过渡、熔池动态行为变化进行了深入分析。

### 2.2 送丝方式对焊丝熔化效率的影响

利用高速摄像系统实时采集了两种送丝方式下不同沉积层熔滴过渡到熔池的临界典型图像,如图5所示。从图5可知,后送丝时一个熔滴过渡到

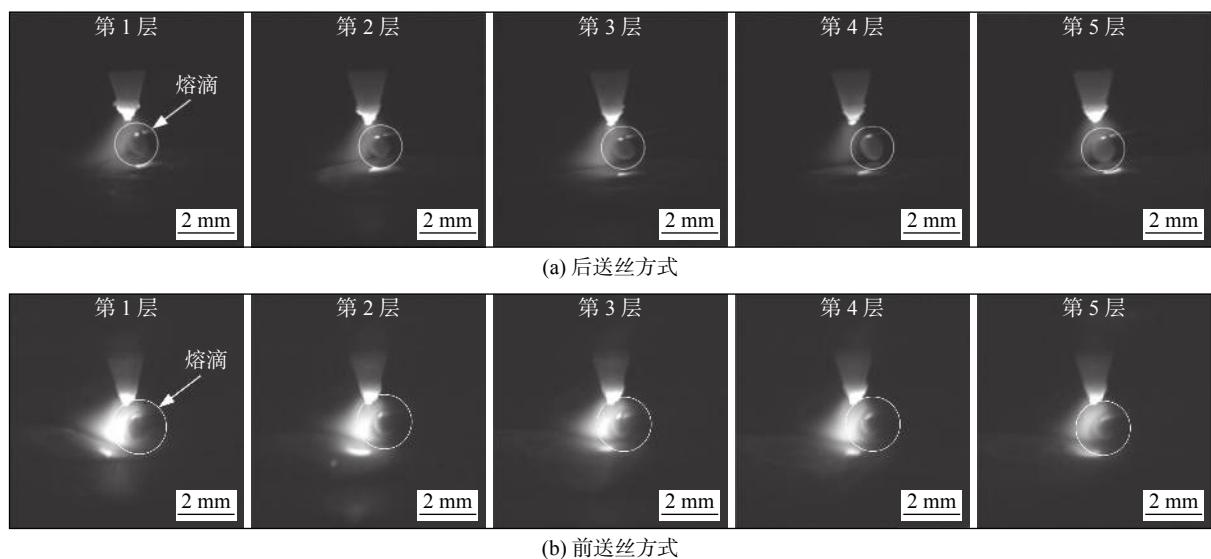


图5 不同沉积层一个脉冲周期内的临界熔滴过渡图像

Fig. 5 Droplet shape in one pulsed cycle with different deposited layer. (a) rear wire feeding mode; (b) lead wire feeding mode

熔池中需一个高脉冲周期;前送丝时一个熔滴完成过渡需两个高脉冲周期。

利用球体模型近似熔滴,计算了熔滴质量如图 6 所示。由图 6 可知,在一个高脉冲周期内,后送丝熔滴质量约为  $0.0117 \sim 0.0121\text{ g}$ ,前送丝熔滴质量约为  $0.00993 \sim 0.0109\text{ g}$ 。因为后送丝时焊丝不仅被电弧加热,而且受到熔池辐射加热。同时,采用步进填丝方式时,前送丝和后送丝焊丝送进量和电弧热输入均是相同的,但总热输入后送丝高于前送丝。因此,后送丝方式下所熔化的焊丝质量大于前送丝的即单位时间内熔化的焊丝质量增加,熔化效率增加,且后送丝方式下焊丝尖端距离熔池表面较近,熔滴更容易接触熔池,进而熔滴变得更小,过渡频率更高。

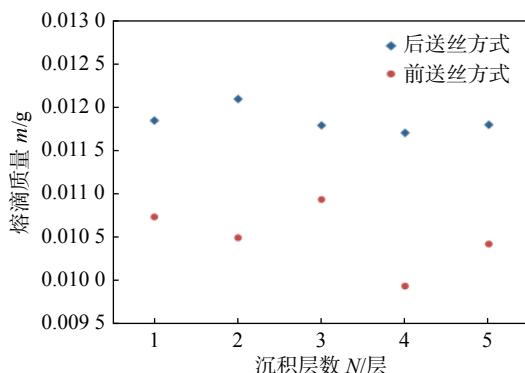


图 6 熔滴质量

Fig. 6 Mass of droplet

### 2.3 送丝方式对熔滴过渡行为的影响

选取前、后送丝方式下焊丝熔化、熔滴并过渡到熔池中的连续图像进行熔滴过渡行为分析,如图 7 和图 8 所示。从图 7 可以看出,前、后送丝方式下熔滴均以搭桥形式过渡,但熔滴过渡尺寸明显不同;前送丝的焊丝熔化位置位于熔池前端,竖直方向距熔池表面较远,定长送进的焊丝被电弧熔化后,形成的熔滴尺寸若不足以与熔池表面接触,难以依赖于自身的重力和电弧等离子流力而过渡到熔池中或者几个高脉冲周期作用形成大尺寸熔滴,与熔池接触发生过渡。因此,增材沉积过程中质量传输不稳定,同时大尺寸熔滴过渡到熔池时,熔池表面波动大,熔池稳定性变差,进而影响沉积层成形精度。而采用后送丝方式时,焊丝熔化位置位于熔池正上方,在竖直方向距熔池表面很近,熔滴可以以较小尺寸过渡到熔池中,对熔池表面冲击力减小,沉积

传质过程变得稳定,因此,从传质角度保证了成形过程的稳定与均匀。

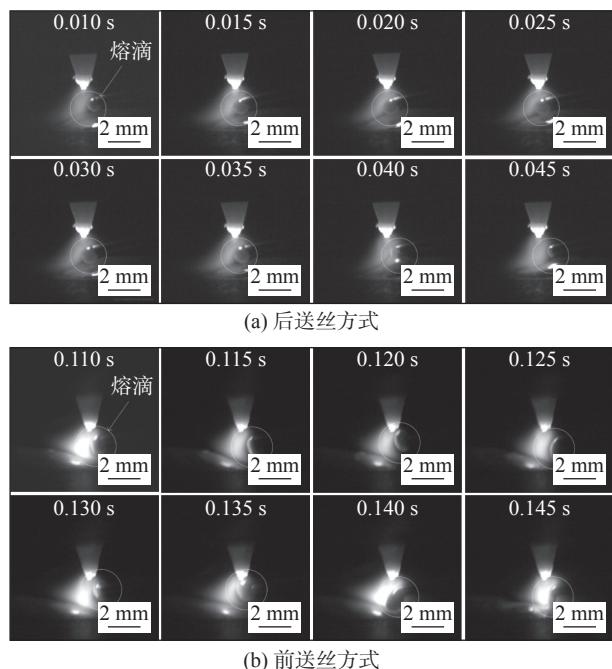


图 7 熔滴过渡行为

Fig. 7 Droplet transfer behavior. (a) rear wire feeding mode; (b) lead wire feeding mode

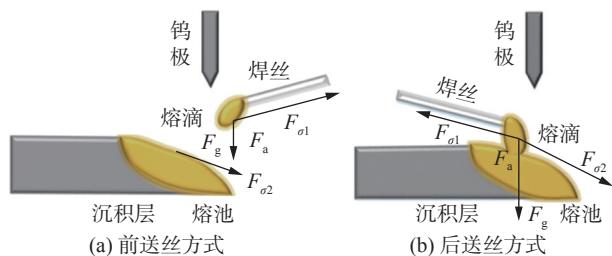


图 8 熔滴过渡受力分析

Fig. 8 Force analysis of droplet transition. (a) lead wire feeding mode; (b) rear wire feeding mode

图 9 为采用图像处理的方法测量计算获得的熔滴尺寸变化。前送丝熔滴半径变化范围是  $0.883 \sim$

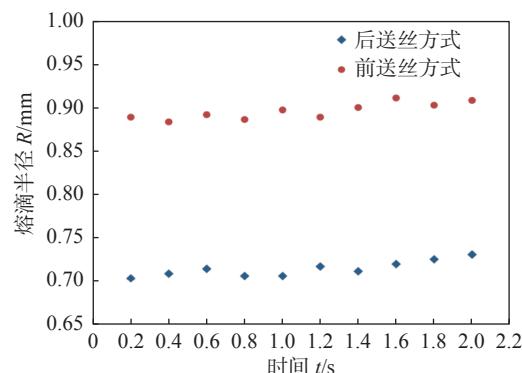


图 9 不同送丝方式下的熔滴半径

Fig. 9 Droplet radius of different transfer mode

0.911 mm, 后送丝熔滴半径变化范围为 0.703 ~ 0.730 mm。由此可知, 熔滴过渡的不稳定性及传质过程的不稳定是造成沉积层成形尺寸在高度和宽度方向不一致的关键因素之一。

#### 2.4 送丝方式对熔池行为的影响

熔滴过渡模式及尺寸对熔池瞬态热力平衡引

起波动, 造成成形精度变化。因此, 提取熔池表面波动数据来表征熔池的稳定性及预测沉积层成形精度。采用熔滴熔入到熔池中引起表面高度最大变化值  $\Delta H$  来进行表征, 如图 10 所示。连续提取从第 1 ~ 5 层给定一低脉冲群内的熔池表面波动数据, 前、后送丝的波动情况分别如图 11 所示。

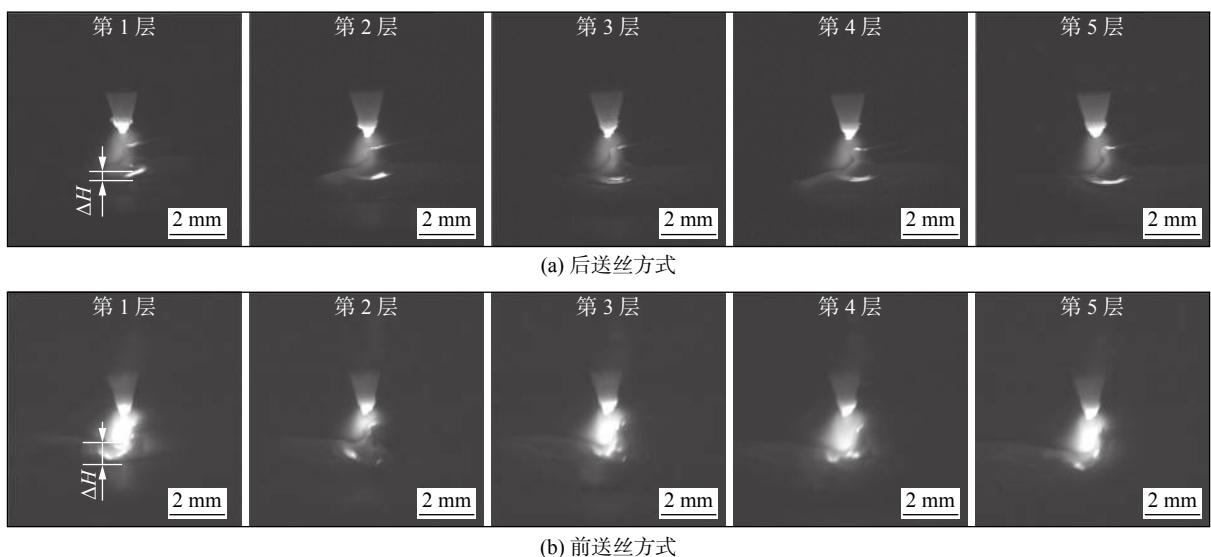


图 10 熔池高度提取示意图

Fig. 10 Schematic diagram of weld pool height. (a) rear wire feeding mode; (b) lead wire feeding mode

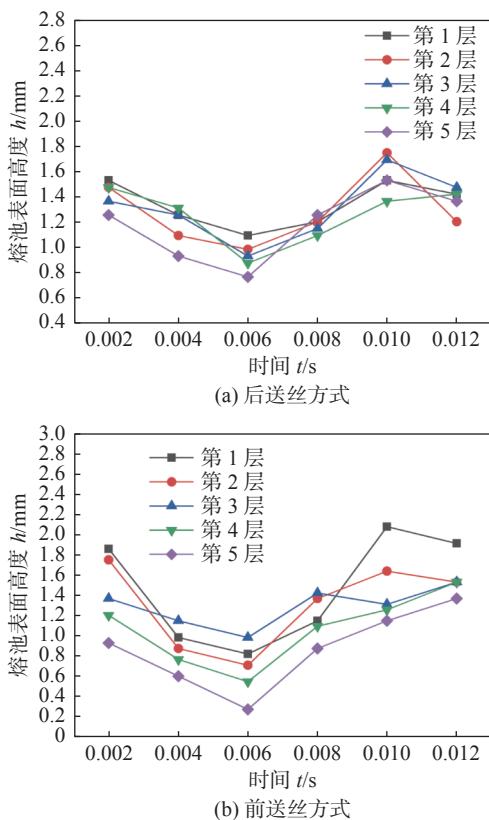


图 11 熔池表面高度变化

Fig. 11 Variation of weld pool height. (a) rear wire feeding mode; (b) lead wire feeding mode

结合图 10 和图 11 可知, 不同送丝方式下每一沉积层熔池表面均动态变化; 后送丝方式下第 1 至第 5 层沉积熔池表面高度在 0.76 ~ 1.74 mm 间变化, 前送丝下高度在 0.27 ~ 2.07 mm 之间浮动。整体呈现出前送丝熔池波动较剧烈, 后送丝曲线波动比较平缓; 且表面高度变化小的沉积层最终成形较好, 与图 3 所示的沉积件形貌一致。因此, 利用增材沉积熔池表面高度变化来预测沉积层形貌及成形精度是可行的, 为检测控制成形精度提供了新的测量方法。

增材沉积过程中熔池宽度变化直接反映着沉积层侧面成形几何尺寸精度, 因此, 为研究不同送丝方式下熔池宽度的动态变化规律, 从采集的熔池视频图像中提取了不同沉积层多个时间点的正面熔池宽度特征数据, 结果如图 12 所示。同时, 采用红外热成像仪采集了每一层沉积结束熄弧瞬间熔池表面的温度变化图像, 获得了熔池表面的最高温度, 结果如图 13 所示。

由图 12 和图 13 可见, 第 1 ~ 10 层沉积过程中, 前送丝的熔池宽度变化范围为 6.1 ~ 8.3 mm, 熔池表面最高温度在 1 490 ~ 1 752 °C 之间变化; 后

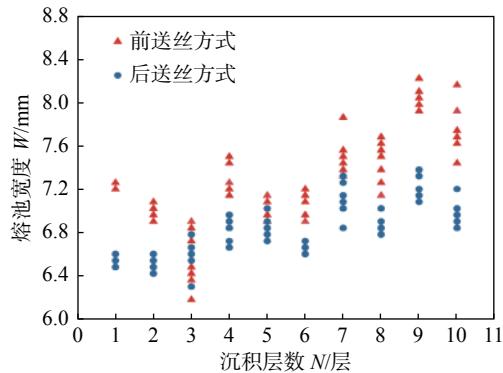


图 12 熔池宽度

Fig. 12 Weld pool width

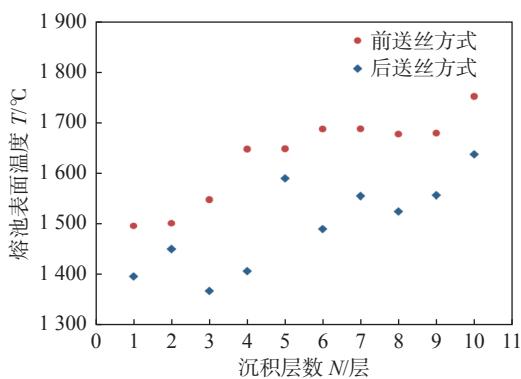


图 13 不同沉积层熄弧瞬间熔池最高温度

Fig. 13 Molten pool maximum temperature of different deposition layers

送丝的熔池宽度变化范围为  $6.3 \sim 7.3$  mm, 熔池表面最高温度在  $1366 \sim 1637$  °C 之间变化。分析认为, 在前送丝方式下, 焊丝尖端在熔池正前端且竖直方向距离熔池表面较高。因此, 焊丝熔化所形成的熔滴不能以小尺寸快速过渡到熔池, 而形成较大体积尺寸熔滴并与熔池表面接触过渡。在此过程中高脉冲电流群作用焊丝时间增长, 同时对熔池的热输入也不断增加, 导致对上一沉积层的稀释率增加, 熔池自身体积变大; 另外, 较大熔滴过渡到熔池中, 熔池质量进一步增加, 产生较大的表面冲击, 在此双重热质作用下熔池极易发生失稳, 形成阶梯状沉积层。熄弧瞬间较高的熔池表面温度使表面张力对液态金属的约束能力减弱, 加剧了熔池状态的失稳。反之, 后送丝模式下, 焊丝熔化质量基本相同, 但熔滴过渡频率增加, 尺寸减小, 且高脉冲电流群加热焊丝时间变短, 熔池热输入减小, 导致前一沉积层稀释率下降, 熔池自身体积略微增加, 且熄弧熔池表面温度明显低于前送丝的, 因此, 熔池的热力平衡状态更稳定, 发生失稳液态金属侧流淌形成

阶梯状形貌的能力减弱。由此说明, 熔池表面张力对维持熔池动态稳定具有重要的作用。

从图 12 可知, 前、后送丝方式下, 随沉积层数的增多, 熔池宽度都有增加, 沉积层成形宽度也增加。主要因为从下向上增材散热条件变差, 热积累增强, 致使高层沉积过程中熔池温度升高, 表面张力减小, 稀释率增加, 熔池约束力减小, 易向两侧流淌, 出现侧阶梯状形貌。基于以上试验结果, 采用熔池表面宽度和表面温度信息也可以表征沉积层尺寸变化情况, 预测增材成形精度。

### 3 结论

(1) 步进填丝双脉冲 TIG 电弧增材制造方法能够实现稳定的电弧增材沉积过程, 获得成形精度较高的直壁墙成形件。

(2) 步进填丝双脉冲 TIG 电弧增材熔滴以液桥模式过渡为最佳, 后送丝方式下沉积层高变化约为  $0.98$  mm, 横向宽度变化约为  $1.0$  mm; 前送丝沉积层高变化约为  $1.80$  mm, 横向宽度变化约为  $2.2$  mm, 呈现出侧面阶梯状形貌, 成形精度较低。

(3) 采用熔池表面波动幅值、熔宽及熄弧表面最高温度信息表征步进填丝双脉冲 TIG 电弧增材制造过程稳定性及预测成形精度是可行的, 为增材过程检测与控制提供了一种新方法。

(4) 前、后送丝方式下造成步进填丝双脉冲 TIG 电弧增材成形精度不同的主要原因是: 焊丝熔化效率改变、熔滴过渡尺寸不同造成的传质过程不稳定和熔池自身体积变化及热输入变化打破熔池受力平衡态双重作用的熔池失稳, 最终导致成形精度下降。

### 参考文献

- [1] Mughal M P, Fawad H, Mufti R A. Three-dimensional finite element modelling of deformation in weld-based rapid prototyping[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2006, 220(6): 875 – 885.
- [2] Zhao Pengkang, Fang Kui, Tang Cheng, et al. Effect of interlayer cooling time on the temperature field of 5356-TIG wire arc additive manufacturing[J]. China Welding, 2021, 30(2): 17 – 24.
- [3] Caffrey T. Additive manufacturing and 3D printing state of the industry annual worldwide progress report[J]. Engineering Management Research, 2013, 2(1): 209 – 222.

- [4] Yang D, He C, Zhang G. Forming characteristics of thin-wall steel parts by double electrode GMAW based additive manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 227: 153 – 160.
- [5] 张瑞英,蒋凡,陈树君,等.旁路电源工作模式对Arcing-wire PAW电特性与熔滴过渡的影响[J].焊接学报,2017,38(2):41 – 46.  
Zhang Ruiying, Jiang Fan, Chen Shujun, et al. Influence of bypass power mode on electrical properties and droplet transition of arcing-wire PAW[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(2): 41 – 46.
- [6] 李旭文,宋刚,张兆栋,等.激光诱导电弧复合增材制造316不锈钢的组织和性能[J].中国激光,2019,46(12): 101 – 109.  
Li Xuwen, Song Gang, Zhang Zhaodong, et al. Microstructure and properties of 316 stainless steel produced by laser-induced arc hybrid additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 101 – 109.
- [7] Xiong J, Zhang G J. Adaptive control of deposited height in GMAW-based layer additive manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(4): 962 – 968.
- [8] Font comas T, Diao C, Ding J, et al. A passive imaging system for geometry measurement for the plasma arc welding process[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7201 – 7209.
- [9] 刘理想,柏兴旺,周祥曼,等.电弧增材制造多层单道堆积的焊道轮廓模型函数[J].焊接学报,2020,41(6): 24 – 29,36.  
Liu Lixiang, Bai Xingwang, Zhou Xiangman, et al. Study on the weld profile model function of multi-layer single-pass deposition in wire and arc additive manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(6): 24 – 29,36.
- [10] 韩庆璘,李大用,李鑫磊,等.基于分区减光的电弧增材制造熔敷道尺寸主被动联合视觉检测[J].焊接学报,2020,41(9): 28 – 32.  
Han Qinglin, Li Dayong, Li Xinlei, et al. Bead geometry measurement for wire and arc additive manufacturing using active-passive composite vision sensing based on regional filter[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(9): 28 – 32.
- [11] 朱贝贝,熊俊.交叉件GTA填丝增材制造弧压检测与成形控制[J].机械工程学报,2019,55(15): 17 – 23.  
Zhu Beibei, Xiong Jun. Arc voltage detection and forming control for crossing parts in GTA additive manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(15): 17 – 23.
- [12] Li F, Chen S, Wu Z, et al. Adaptive process control of wire and arc additive manufacturing for fabricating complex-shaped components[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96: 871 – 879.
- [13] Xiong X, Zhang H, Wang G, et al. Hybrid plasma deposition and milling for an aeroengine double helix integral impeller made of superalloy[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26(4): 291 – 295.
- [14] Ding D, Shen C, Pan Z, et al. Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part[J]. Computer-Aided Design, 2016, 73: 66 – 75.

**第一作者:**李璐鹏,硕士研究生;主要研究方向为电弧增材制造成形控制;Email: 719585771@qq.com。

**通信作者:**张刚,博士,副研究员;Email: zhanggang@lut.edu.cn。

(编辑: 张芷晴)