DOI: 10.3901/JME.2019.15.039

基于熔池动态特征的金屬激光熔化沉积形状精度演化行为研究^{*}

唐梓珏 刘伟巍 颜昭睿 王 灏 张洪潮
(大连理工大学机械工程学院 大连 116024)

摘要: 针对金属激光熔化沉积成形质量影响机制与过程特征不明确所导致的质量可靠性与效果重复性较低、自适应控制困难等问题,采用同轴实时监测的方法,对不同金属激光熔化沉积工艺条件下的熔池动态特征进行监测,揭示不同熔池动态特征对形状精度演化行为的影响机制。以典型沉积工艺为研究对象,单道单层沉积中熔池几何轮廓和边缘熔融过渡区域面积与沉积层表面质量和宽度稳定性直接相关;单道多层堆积中的熔池几何轮廓与尾部特征对薄壁件壁厚变化有重要影响;多道单层搭接中熔池宽度的累加与粉末利用率的变化导致了传统搭接模型最优搭接率下表面搭接质量的下降;单道多层偏移堆积中的熔池塌陷与沉积层两端熔池面积可直接反应极限偏移与两端倾斜的演化过程。结果表明,通过熔池动态特征可以揭示金属激光熔化沉积中关键形状精度的演化行为,并建立新的形状精度模型,为后续激光熔化沉积工艺路径设计及实时反馈优化提供重要支持。

关键词: 增材制造; 定向能量沉积; 激光熔化沉积; 熔池; 形状精度

中图分类号: TH162

Study on Evolution Behavior of Geometrical Accuracy Based on Dynamic Characteristics of Molten Pool in Laser-based Direct Energy Deposition

TANG Zijue LIU Weiwei YAN Zhaorui WANG Hao ZHANG Hongchao
(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: Due to complex influence mechanisms and process features, low quality reliability, processing repeatability and adaptive control ability are important problems in laser-based direct energy deposition. Dynamic characteristics of molten pools are monitored by coaxial visual monitoring and present the influence mechanism of the dynamic characteristics on evolution behaviour of geometrical accuracy in laser-based direct energy deposition. Four typical processes are main objects investigated. In single-track single-layer cladding, contour profiles and special grayscale region area have a direct relationship with surface qualities and width stability of molten pools. In single-track multi-layers accumulation, geometry and characteristics of molten pool tails have important effect on the change of deposition widths. In multi-tracks single-layer overlap, gradual increasing widths of molten pools and different powders utilization ratios leads to a decrease of surface geometrical accuracy based on traditional overlap models. In single-track multi-layers overhang accumulation, molten pool areas in both sides and molten pool collapse indicate the evolutionary process of incline edges and the overhang maximum. The results show the dynamic characteristics of molten pools can be used to study the evolution behaviours of key geometrical accuracy, and helpful for building geometrical models. The dynamic characteristics of molten pools are also beneficial for the researches about process planning and real-time feedback control.

Key words: additive manufacturing; direct energy deposition; laser melting deposition; molten pool; geometrical accuracy

0 前言

定向能量沉积作为一种增材制造技术,可以加工复杂结构梯度金属材料零部件,在工业中主要应

用于直接成形、表面涂覆以及再制造修复等领域。定向能量沉积技术的能量源有激光束、电子束、等离子束和电弧等。相比之下,激光束以其柔性传输性好、稳定性高、无需真空环境、成本适中以及便于同轴在线监测等优势获得了广泛的应用。以激光束作为能量源,采用定向能量沉积来加工金属零部件的方法,称为金属激光熔化沉积。

目前,因金属激光熔化沉积过程中的传质、传热

^{*} 国家基础研究与发展计划(973 计划, 2011CB013402)和辽宁省自然科学基金联合基金(20180520020)资助项目。20181209 收到初稿, 20190319 收到修改稿

与对流等多物理场耦合作用复杂所导致的加工质量可靠性与效果重复性较低、自适应控制困难,以及因不同材料匹配与复杂毛坏结构所导致的工艺参数设计困难与耗费资源较多等一直是该技术面临的重要问题。为解决上述问题,许多研究人员尝试采用视觉监测的方法对熔池熔化、熔融与凝固这一动态过程中的特征,即熔池动态特征进行研究,其中包括熔池几何轮廓和宽度等,明确其对成形质量的影响机制,为激光熔化沉积在线监控提供可靠监测对象的同时,也有助于工艺路径参数快速设计与优化方法的提出。国内外学者对激光熔化沉积等热源加工过程中熔池动态特征视觉方面的研究主要采用同轴与旁轴两种方式进行,其中,同轴视觉监测因具备更高的柔性自动化能力而受到了更广泛的重视。

HOFMAN 等^[1]采用同轴视觉的方法监测熔池宽度,并证明了熔池宽度与沉积层稀释率及硬度的关系。为准确获得熔池宽度,SONG 等^[2]提出了基于相位一致性的熔池宽度提取方法,该方法在具备较好鲁棒性的同时也可以获得较高的精度。AKBARI 和 KOVACEVIC^[3]通过同轴监测的方法研究了薄壁与块状成形时熔池视觉等温线轮廓的演化行为,并建立了其与凝固组织及力学性能之间的关联关系。GHARBI 等^[4]采用旁轴监测的方法研究了脉冲激光熔化沉积时熔池表面的波动规律。WIRTH 等^[5]通过加入高熔点低密度粉末示踪的方法,研究了激光熔化沉积过程中熔池表面的对流场情况。除激光熔化沉积外,焊接与重熔等热源加工领域也进行了熔池动态特征相关研究。裴莹蕾等^[6]则通过旁轴视觉监测的方法,分析了驼峰焊道形成、生长与凝固过程的熔池动态特征,并提出了相应的抑制方法。石玓等^[7-8]通过旁轴激光器反射视觉图像的方法获得了熔池振荡频率,并对焊接熔透状态进行了监测,同时也采用上述方法与示踪粒子相结合,对加工过程中熔池的表面流速进行了检测。类似针对熔池对流进行的示踪方法研究,同样被 ZHAO 等^[9-10]应用于激光重熔中。王理林等^[11]则通过同轴监测的方法,研究了不同扫描方向下熔池内枝晶生长的演化过程,结果表明凝固组织受熔池几何轮廓和基材晶体取向共同影响。目前,上述研究在激光熔化沉积领域大多局限在单道单层沉积或单道多层堆积中,而对其它的一些典型工艺(如多道单层搭接、单道多层偏移堆积)的研究还不够充分,并且单道多层堆积壁厚、多道单层搭接率、单道多层堆积偏移量等关键参数变化时其熔池的动态特征依旧不明确,这阻碍了激光熔化沉积形状精度的提高与反馈控制的实现。

本文通过同轴视觉监测的方法对激光熔化沉积

熔池动态特征及其对形状精度的影响机制进行了分析研究,明确了不同熔池动态特征对激光熔化沉积四种典型工艺(单道单层沉积、单道多层堆积、多道单层搭接、单道多层偏移堆积)关键形状精度演化行为的影响,并建立了形状精度相关的搭接与偏移堆积模型。本研究同时也为激光熔化沉积质量的在线监测与工艺路径参数的快速设计及实时优化提供了重要支持。

1 试验设备与材料

本次试验所用的激光熔化沉积系统由六轴机器人(KUKA KR30HA)、激光头(PRECITEC YC52)、半导体激光器(Laserline Manual LDF-4000-100 VGP)和送粉器(RC-PF-01B-2)组成。半导体激光器与激光头之间由光纤连接,金属粉末经分粉器由四个送粉管进行同轴送粉。激光熔化沉积系统的同轴视觉监测模块由计算机、CMOS 相机、图像同轴采集单元组成。图像同轴采集单元内的分光镜可以正向通过 900~1 070 nm 的激光束,反向通过 520~720 nm 的可见光。实时采集熔池视觉图像的 CMOS 相机参数为 172 fps 和 1.3 Mptx,所采集的图像最后由计算机进行图像处理与识别。整体试验设备的示意图与实物图分别如图 1 和图 2 所示。试验过程中的保护气和载粉气均为纯度 99.999% 的氩气,试验所用材料为 316L 基体和 316L 粉末,粉末的粒径为 45~150 μm ,其化学成分(质量分数)如表 1 所示。

图 1 激光熔化沉积系统及其同轴视觉监测模块示意图

(a) 半导体激光器

(b) 六轴机器人

图 2 激光熔化沉积系统及其同轴视觉监测模块实物图

表 1 316L 粉末化学成分(质量分数%)

C	Mo	Ni	Mn	Cr	Si	Fe
0.006	2.6	12.8	1.5	17.0	0.7	其他

2 单道单层沉积熔池动态特征及其对形状精度影响分析

单道单层沉积是激光熔化沉积技术的基础，其熔池动态特征的研究将为不同材料匹配时的最优工艺参数提供快速的设计方法。单道单层沉积时主要关注沉积层的表面质量与宽度是否能保持稳定。

图 3 为该试验系统单道单层沉积时的工艺参数-视觉特征-表面质量关系图及不同熔融状态下熔池几何轮廓。该图表明不同熔池几何轮廓下的沉积质量有明显差异。当熔池几何轮廓为近圆形时，高斯分布圆形能量源形成的熔池传质稳定，沉积状态为正常熔融；当熔池几何轮廓为不规则形状时，距离能量源较远位置无法形成稳定的边缘传质状态，熔池为不完全熔融，沉积层宽度不均匀；当无法形成稳定的熔池时，粉末难以熔化，沉积状态为不连续熔融，无法成形连续稳定的沉积层；当熔池几何轮

图 3 工艺参数-视觉特征-表面质量关系图及不同熔融状态下的熔池几何轮廓

廓为倒梯形时，功率与速度比以及单位时间内的送粉量过高，沉积状态为过度熔融，沉积层接触角较大，稀释率过低，界面强度不足。因此，图 3 中熔池几何轮廓为稳定近圆形时的工艺参数可作为首选的工艺参数范围，但此参数范围较广泛，沉积质量依旧不够稳定。

图 4 中的熔池图像为激光熔化沉积时正常熔融状态下的熔池视觉图像，图像中熔池的边缘处存在明显的熔融过渡区域，且过渡区域灰度明显小于熔池中心的完全熔融区域。当边缘熔融过渡区域面积较低时，熔池对流传质状态更加稳定，熔池宽度变化较小。因此，以熔池边缘过渡区域面积与熔池面积的比值作为正常熔融状态下熔池动态特征和沉积质量的在线监测对象，图像处理后的熔池边缘熔融过渡区域和熔池面积计算区域分别如图 4b 和 4c 所示。实际的熔融沉积状态则由熔池面积 S_i 的相对平均误差来进行表示，熔池面积相对平均误差 θ 计算公式为

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - \bar{S}|}{\bar{S}} \quad (1)$$

式中， $\bar{S}$ 为熔池平均面积； n 为采集的熔池图像数量，试验结果如图 5 所示。结果表明，在正常熔融下熔池边缘过渡区域面积与熔池面积的比值和熔池面积的相对平均误差之间明显相关，较小比值下的熔池面积相对平均误差更小，当正常熔融下边缘熔融过渡区域面积与熔池面积的比值小于 0.3 时，熔池面积相对平均误差小于 5%。

图 4 正常熔融状态下的熔池

(a) 激光功率

图 5 不同激光功率和扫描速度下边缘熔融过渡区域面积比值与熔池面积相对平均误差的关系图

综上所述,在单道单层沉积中,首先可通过熔池几何轮廓对沉积质量进行初步判断,过度熔融状态时需要提升扫描速度或降低送粉量;不连续熔融与不完全熔融时可通过提升激光功率或降低扫描速度来达到正常熔融状态。然后,通过熔池边缘熔融过渡区域与熔池面积的比值来做进一步判断,提升激光功率、降低扫描速度或降低送粉量均可减小该比值,以达到更稳定的沉积状态。

3 单道多层堆积熔池动态特征及其对形状精度影响分析

单道多层堆积是成形薄壁结构的基础工艺,在堆积层数较高或成形梯度材料时,由于热累积与不同材料匹配等原因,壁厚不均匀与壁面平整性不佳是面临的主要问题。堆积熔池动态特征的研究将对上述现象的产生进行实时监测、识别与预测,同时解决因堆积加工时间较长所导致的工艺设计耗费资源较多的问题。

熔池几何轮廓及尾部特征是堆积熔池动态特征的主要研究对象。图 6a 和图 7a 为薄壁结构堆积过程中均匀壁厚与表面平整时的熔池图像,此时熔池两侧固液边界处的散热主要为向下的固态传热及向两边的空气对流散热,熔池两边的散热较慢,因此,熔池较长呈近矩形,而激光束能量圆形高斯分布导致了熔池中心相比于两端温度较高且池底较深,这又引起冷却过程中熔池的钝角形状尾部特征;图 6b 和图 7b 为壁厚增加时的熔池图像,熔池两侧固液边界处的散热依旧主要为向下的固态传热及向两边的空气对流散热,因此,熔池依旧较长呈近矩形,但因此时熔池宽度大于前一沉积层,熔池会出现单侧或双侧溢出现象并导致溢出侧的熔池尾部呈近似直

角,同时溢出侧熔池边缘处无明显固液边界;图 6c 和图 7c 为壁厚降低时熔池的图像,此时因熔池边缘散热较前两者不同,除向下的固态传热外,熔池两侧固液边界处也具有固态传热条件,热量传递较好,因此,熔池较前两者长宽比更均匀,为近圆形,熔池尾部角度则由于激光束的圆形高斯分布等原因为钝角。

图 6 不同堆积状态时的熔池几何轮廓

图 7 不同堆积状态时的熔池尾部特征

为验证单道多层堆积中的熔池特征,设计了如表 2 所示的验证试验。实际堆积层截面轮廓与各层熔池动态特征如图 8 所示,其中熔池长宽比小于 1.2 的认为近圆形,大于 1.2 的认为近矩形。图 8j 为在基体上的第 1 沉积层,此时熔池边缘散热情况好且无热累积情况,熔池呈近圆形且尾部为钝角;8b、8g 与 8h 中熔池呈近圆形且尾部为钝角,此时堆积层壁厚均减小;图 8a、8c、8e 与 8f 中熔池较长呈近矩形且尾部为钝角,此时堆积层壁厚变化不明显;图 8i 中熔池虽未出现溢出现象,但熔池呈近矩形且尾部接近直角,此时堆积层壁厚由于热累积与离焦量等原因有逐渐增加趋势;图 8d 中熔池出现单侧溢出现象,熔池呈矩形且尾部接近直角,两侧固液边界不明显,此时堆积层壁厚明显增加。

综上,近矩形熔池几何轮廓与直角尾部特征表示壁厚的增加,近矩形熔池几何轮廓与钝角尾部特征表示均匀的壁厚,近圆形熔池几何轮廓与钝角尾部特征表示壁厚的减小。针对热累积等原因所导致的壁厚增加,可在熔池尾部特征有呈近直角的趋势且固液边界逐渐缩小时预测出后几层壁厚的增加,进而通过减小激光功率或提升扫描速度的方法进行调节。根据每层壁厚的变化规律也可对加工后的壁面平整性进行预测。

图8 单道多层堆积层截面轮廓与熔池视觉特征
(各图中右下角为熔池长宽之比)

表2 单道多层堆积加工试验验证所选参数

	激光功率 /W	扫描速度 /(mm/s)	送粉量 /(g/min)	Z轴提升量 /mm
1~10	1 200	6	9.15	0.6
11~20	900	6	9.15	0.6
21~30	1 500	6	9.15	0.6
31~40	1 200	9	9.15	0.6

4 多道单层搭接熔池动态特征及其对形状精度影响分析

激光熔化沉积多道单层搭接时, 搭接处为缺陷与表面精度误差产生的关键区域, 良好的搭接率可以有效提升激光熔化沉积的搭接质量。目前最佳搭接率的获得往往需要大量的试验, 且现有搭接模型大多由焊接中得到, 用于激光熔化沉积中时误差较大。因此, 多道搭接熔池动态特征研究将明确实际搭接率的变化规律, 并优化激光熔化沉积搭接模型。

本部分内容所采用的表面搭接质量表征方法为沉积层截面轮廓最高与最低处之差。本小节试验参数为激光功率 1 200 W, 扫描速度 6 mm/s, 送粉量 9.15 g/min。参考传统面积等效搭接计算模型^[12-14], 如图 9 所示, 则传统模型中搭接位移量 d 为最佳时

$$d = \frac{S_{HIKI}}{h} = \frac{S_{AFC}}{h} =$$

$$\left(\frac{4h^2 + W^2}{8h^{3/2}} \right)^2 \arcsin \left(\frac{4Wh}{4h^2 + W^2} \right) - \frac{(W^2 - 4h^2) \times W}{16h^2} \quad (2)$$

式中, W 为沉积层宽度 3.08 mm, h 为沉积层高度 0.68 mm, 求得 $S_{AFC} = S_{HIKI} = 1.449 \text{ mm}^2$, 搭接偏移量 $d = 2.13 \text{ mm}$, 此时的搭接率为 $\eta = \frac{W-d}{W} = 30.8\%$ 。

图9 激光熔化沉积最佳搭接率的传统计算示意图

选取搭接率为 30%、50%、70% 时进行多道单层搭接试验。图 10 为搭接时的熔池图像、实际搭接位置及其搭接质量, 因熔池头部边缘实际搭接处的对流质行为有明显变化, 因此实时的搭接特征明显。同时, 结果也表明即便在传统模型中的理论最优搭接率下, 依然无法获得理想的搭接质量, 且实际结果与传统的面积等效搭接模型具有较大差异。该差异主要有两个原因, 第一个原因是目前激光熔化沉积模型大多未考虑搭接加工过程中多道熔池动态特征的变化, 图 11 所示为搭接过程中的熔池宽度变化规律。在有限的多道搭接过程中, 随着搭接道数的增加熔池宽度逐渐增加, 特别是第二道宽度的增加最为明显, 具体情况如图 12 所示。相应的搭接率变化计算公式为

$$\eta_n = \eta_{n-1} + \frac{b}{2(W+b+c)} \quad (3)$$

式中, η_n 为实时的第三道搭接率, η_{n-1} 为前第二道与第一道间的搭接率, b 与 c 分别为第二道和第三道沉积层相比于前一道沉积层宽度的增加值。这表明由单道确定的沉积层几何参数并不能准确应用于搭接模型中, 而固定的预设搭接值更会导致搭接率的逐步增加, 特别在前几道搭接中有较大影响。第二个原因是目前的模型主要由焊接(送丝沉积)模型中得到, 未考虑送粉沉积中粉末利用率的变化。表 3

图10 不同搭接率时的熔池图像、实际搭接位置及其搭接质量

为不同搭接率下的粉末利用率,随着搭接率的增加,粉末利用率由 80% 下降至 50% 左右,因此传统的搭接模型最优搭接率计算方法无法适用于激光熔化沉积金属粉末中。

图 11 搭接沉积中不同搭接率为时熔池宽度的变化规律

图 12 多道单层搭接模型图

表 3 搭接沉积中不同搭接率下的粉末利用率(10 道)

搭接率(%)	0	30	50	70
粉末利用率(%)	80.26	68.42	59.21	52.63

针对上述问题,本研究提出新的搭接率模型,该模型考虑熔池宽度的变化和粉末利用率,如图 12 所示。为验证该模型的有效性,以 30% 搭接率为例,将其与传统的面积等效模型相对比,结果表明新的模型其表面高低差 h 的均值为 0.188 1 mm,实际均值为 0.181 5 mm,该模型误差较小,可适用于金属粉末的激光熔化沉积。

综上,在多道单层搭接时,熔池视觉特征可反映实际搭接值,结合熔池宽度变化规律与搭接模型,可在搭接时通过位移量和工艺参数的调节获得更好的搭接质量。

5 单道多层偏移堆积熔池动态特征及其对形状精度影响分析

金属激光熔化沉积的重要优势之一是复杂结构零部件的加工,如叶片、机匣、燃烧室等,这些加工过程中往往需要使用多层偏移堆积加工工艺。该工艺加工过程中的主要问题有:过大的偏移量导致

熔池完全塌陷,成形困难,如图 13a 所示;较大的偏移量引起沉积层高度降低,离焦量逐渐增加,无法成形,如图 13b 所示;垂直薄壁件起始与终止位置的停留时间无法满足偏移堆积成形,进而导致激光起始与终止位置沉积层向内倾斜,无法垂直于基体,如图 13c 所示。图 13 中所用的工艺参数均为激光功率 1 200 W,扫描速度 6 mm/s,送粉量 9.15 g/min。

图 13 偏移量分别为 0.5, 0.4, 0.3 和 0.2 mm 时的偏移堆积效果图

图 13a 中,熔池完全塌陷并呈现出搭接率较大时的搭接特征,堆积高度逐渐累加,后因离焦量的增大而单层沉积层厚度降低直至无法成形。图 13b 中,因沉积层高度降低导致离焦量增加,使熔池宽度减小,而偏移量不变的情况下熔池的悬垂部分所占比逐渐增加,如图 14a 和 14b 所示,黏性力与重力间关系无法稳定,沉积层高度出现起伏,最终引起图 14c 中的无法成形问题。图 13c 中,根据宋梦华等^[15]的研究,在垂直沉积中由于单层沉积层两端的弧形横截面,其与激光束相交形成的边界熔池将向内部收缩,进而导致沉积层两端的倾斜。因此,多层堆积中通过两端停留一定时间来抑制该问题的产生。根据前期试验,垂直堆积时两端最佳的停留时间为 0.3 s,在本论文偏移堆积试验中同样采用了 0.3 s 的停留时间,沉积层两端停留时间内的熔池动态特征如图 15 所示。结果表明,因偏移堆积时起始

与终止位置的熔池面积和垂直堆积时不同，导致了原有的两端停留时间无法满足偏移堆积需求，沉积层两端逐渐向内倾斜，而当两端停留时间内无法形成熔池时，倾斜角度会变大，因此图中沉积层两端的倾斜角度会出现明显转变。

图 14 成形层数局限时的熔池动态特征

图 15 沉积层两端倾斜时的熔池动态特征

为明确熔池不同动态特征的形成原因，需要计算黏性力与重力的关联关系。图 16a 为熔池塌陷时的熔池图像，图 16b 为偏移堆积示意图，在理想 Z 轴提升量下， $S_{CDI} = S_{LCFE} + S_{BDG}$ ，又因 $S_{AKL} = S_{EFJ}$ ，所以， $S_{ABI} = S_{KBGJ}$ ，最后求得的提升量 ΔZ 为

$$\Delta Z = \frac{\left(\frac{4h^2 + W^2}{8h} \right)^2 \arcsin\left(\frac{4Wh}{4h^2 + W^2} \right) - \frac{(W^2 - 4h^2)W}{16h}}{W} \quad (4)$$

式中， W 为沉积层宽； h 为沉积层高。在激光功率 1 200 W，扫描速度 6 mm/s，送粉量 9.15 g/min 时，沉积层宽度 $W=3.08$ mm，高度 $h=0.68$ mm。求得， $\Delta Z=0.47$ mm。但实际加工中由于粉末利用率与激光束不稳定等原因， $\Delta Z=0.47$ mm 时无法成形，因此，通过试验，最终选择 $\Delta Z=0.30$ mm 作为试验中的 Z 轴提升量。

(a) 熔池图像

(b) 偏移堆积示意图

(c) 偏移量计算示意图

(d) 熔池几何计算示意图

图 16 偏移堆积计算示意图

图 17 偏移堆积加工不同偏移量时的第 9 层熔池图像

为简化计算量，得到解析解，偏移堆积加工时偏移量的计算示意图如图 16c 所示。最大偏移量计算方法如下所述。

偏移堆积的稳定进行需要偏移悬垂状态下熔池的黏性力大于自身的重力，悬垂熔池的重力

$$G = mg = \rho Vg = \rho L S_{ABCD} g \quad (5)$$

式中， ρ 为熔池密度； V 为熔池悬垂部分体积； L 为熔池悬垂部分长度。根据图 16 和图 17 中的熔池图像，熔池悬垂部分长度 L 的计算示意图如图 16d 所示，正常熔融情况下熔池的 $ABFG$ 区域为形成完整沉积层区域，即便熔池 ABE 部难以完整形成，沉积层依旧可以成形，因此相关计算针对 $ABFG$ 部分进行，其中 BF 为熔池悬垂部分长度 L ， AB 为堆积偏移量 b ， BC 为 Z 轴理想提升量 ΔZ 。假设熔池为牛顿流体，黏性力 $f_{\max}$ 可计算如下，单位为 N

$$f_{\max} = \mu A \frac{\partial V(x)}{\partial x} = \mu S \frac{\partial V(x)}{\partial x} = \mu \times L_{BF} \times L_{BC} \times \frac{\partial V(x)}{\partial x} \quad (6)$$

式中， μ 为动力黏性系数，因激光熔化沉积持续有固态金属粉末进入且冷却速度快，所以相比于冶金

领域确定的动力黏性系数值要高,根据国内外数值模拟文献[16-19]与实际试验综合考虑,本研究中的动力黏性系数取 $0.06 \text{ kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ 。 $\partial V(x)/\partial x$ 为 x 方向的速度梯度,为获得熔池速度场相关参数,采用示踪的方法获得实时的熔池表面流速参数。具体方法为在 316 L 粉末中加入密度小于熔池的 TiC 粉末(粒径为 $45 \sim 90 \mu\text{m}$,重量比 4%,熔点为 3140°C),沉积时未融化的 TiC 粉末汇聚形成熔渣浮于熔池表面,通过对同一 TiC 熔渣在前后两帧图像里位置的变化来进行熔渣位移量的采集,进而通过标定计算得到表面流速情况。示踪试验中,相机的采集帧率为 3500 fps,具体视觉图像如图 18 和图 19 所示,类似研究见文献[5, 7, 9-10]。与上述文献相似,试验获得的熔池流速在中间部分无明显规则,但在边缘处会迅速降低,趋近于扫描速度,法向速度接近为 0 m/s 。假设熔池内部流速由边缘至中央为线性分布,则 $\partial V(x)/\partial x = 2V_{\max}/W$,根据熔池表面的视觉监测,熔池最大流速为 0.6 至 0.8 m/s ,则速度梯度 $\partial V(x)/\partial x$ 约为 390 至 520 s^{-1} 。当处于临界状态时, $mg = f_{\max}$,解得偏移量 b 约为 0.351 至 0.468 mm 。

图 18 示踪 TiC 熔渣

图 19 TiC 熔渣位移图

以此参数为基准进行偏移量分别为 0.3 mm 、 0.4 mm 和 0.5 mm 时的偏移堆积加工试验,加工结果如图 13 所示。试验表明,偏移量为 0.3 mm 时成形质量较好(除两端位置外),在最佳提升量情况下可以实现自优化,不会有成形层数的局限性;偏移量为 0.4 mm 时,熔池虽然没有完全塌陷以致无法成形,但因熔池流速的不稳定引起了黏性力与重力相互

作用的不稳定,使得加工到一定层数时,部分熔池塌陷,沉积层高度逐渐降低,离焦量无法稳定在自优化范围内,成形质量逐渐下降直至无法成形;偏移量为 0.5 mm 时,熔池完全塌陷无法成形。结果表明黏性力与重力关系的计算方法与实际加工结果相符合。

综上所述,偏移堆积熔池动态特征的研究可以实现偏移堆积加工中多种成形与缺陷问题的实时监测与预测,当沉积层两端熔池面积不断减小而引起两端倾斜时,可通过增加沉积层两端的停留时间来进行调节;当黏性力与重力间关系的不稳定或熔池的塌陷导致偏移堆积无法成形时,则需要降低偏移量。

6 结论

(1) 激光熔化沉积时的稳定近圆形熔池几何轮廓与较低的边缘熔融过渡区域面积表示熔池边缘的稳定传质状态,并获得较好的沉积质量。

(2) 单道多层堆积加工时,近矩形熔池与直角尾部特征表示壁厚的增加;近矩形熔池与钝角尾部特征表示均匀的壁厚;近圆形熔池与钝角尾部特征表示壁厚的减小。

(3) 建立了考虑熔池动态特征变化规律与粉末利用率的多道单层搭接模型,该模型在激光熔化沉积中更加适用。

(4) 结合示踪方法与力学关系分析,建立了单道多层偏移堆积极限偏移模型,熔池完全塌陷导致了偏移堆积无法成形;熔池部分塌陷引起的离焦量逐渐增加限制了可堆积层数;沉积层两端熔池面积的减少导致了垂直堆积中的停留时间无法满足偏移堆积需求。

(5) 熔池动态特征的研究在明确其对形状精度影响机制的同时,也为工艺路径的快速设计、在线监测与反馈控制等研究提供了重要支持。

参 考 文 献

- [1] HOFMAN J T, PATHIRAJ B, VAN DIJK J, et al. A camera based feedback control strategy for the laser cladding process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(11): 2455-2462.
- [2] SONG L, WANG F, LI S, et al. Phase congruency melt pool edge extraction for laser additive manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250: 261-269.
- [3] AKBARI M, KOVACEVIC R. An investigation on

- mechanical and microstructural properties of 316LSi parts fabricated by a robotized laser/wire direct metal deposition system[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 23: 487-497.
- [4] GHARBI M, PEYRE P, GORNY C, et al. Influence of a pulsed laser regime on surface finish induced by the direct metal deposition process on a Ti64 alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(2): 485-495.
- [5] WIRTH F, ARPAGAU S, WEGENER K. Analysis of melt pool dynamics in laser cladding and direct metal deposition by automated high-speed camera image evaluation[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 21: 369-382.
- [6] 裴莹蕾, 吴爱萍, 单际国, 等. 基于熔池流动分析的高速激光焊驼峰焊道形成过程研究[J]. *金属学报*, 2013, 49(6): 725-730.
- PEI Yinglei, WU Aiping, SHAN Jiguo, et al. Investigation of humping formation based on melt flow analysis in high-speed laser welding process[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(6): 725-730.
- [7] 黄健康, 孙天亮, 樊丁, 等. TIG 焊熔池表面流动行为的研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(18): 31-37.
- HUANG Jiankang, SUN Tianliang, FAN Ding, et al. Study on the surface flow behavior of tig weld pool[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(18): 31-37.
- [8] 李春凯, 石玓, 顾玉芬, 等. 连续脉冲 GTAW 不同熔透状态熔池振荡频率特征及分析[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(20): 44-50.
- LI Chunkai, SHI Yu, GU Yufen, et al. Characteristic and analysis of weld pool oscillation frequency in different penetration status for continuous P-GTAW[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(20): 44-50.
- [9] ZHAO C X, RICHARDSON I M, KENJERES S, et al. A stereo vision method for tracking particle flow on the weld pool surface[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(12): 104-123.
- [10] ZHAO C X, RICHARDSON I M, PAN Y. Liquid metal flow behaviour during conduction laser spot welding[J]. *Welding in the World*, 2009, 53: 271-275.
- [11] 王理林, 林鑫, 王永辉, 等. 激光重熔熔池凝固组织的实时观察研究[J]. *金属学报*, 2015, 51(4): 492-498.
- WANG Lilin, LIN Xin, WANG Yonghui, et al. Real-time observation of solidification microstructure in laser remelting pool[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2015, 51(4): 492-498.
- [12] 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 Jiuyang, WANG Jihui, LIN Sanbao, et al. Model for multi-beads overlapping calculation in gta-additive manufacturing[J]. *Journal of Mechanical Engineering* 2016, 52(10): 97-102.
- [13] DING D, PAN Z, CUIURI D, et al. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2015, 31: 101-110.
- [14] AIYITI W, ZHAO W, LU B, et al. Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2017, 12(3): 165-172.
- [15] 宋梦华, 林鑫, 刘丰刚, 等. 激光立体成形零件竖直外侧壁向内倾斜的形成及模型[J]. *金属学报*, 2015, 51(6): 753-761.
- SONG Menghua, LIN Xin, LIU Fenggang, et al. Formation and modeling of vertical outside wall of components inclining inward in laser solid forming[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2015, 51(6): 753-761.
- [16] MILLS K C. Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys[M]. Quincy: Woodhead Publishing, 2002.
- [17] 陈家祥. 炼钢常用图表数据手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- CHEN Jiaxiang. Common chart data manual for steel making[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.
- [18] HE X, FUERSCHBACH P W, DEBROY T. Heat transfer and fluid flow during laser spot welding of 304 stainless steel[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2003, 36(12): 1388-1398.
- [19] KUMAR A, DEBROY T. Tailoring complex weld geometry through reliable heat-transfer and fluid-flow calculations and a genetic algorithm[J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2005, 36(10): 2725-2735.

作者简介: 唐梓珏, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为激光增材制造/再制造过程监测与控制。

E-mail: fcsrzd@mail.dlut.edu.cn

刘伟嵬(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为激光增材制造、绿色清洗理论与技术及绿色化机制、机器视觉与智能控制系统等。

E-mail: liuww@dlut.edu.cn