

# 钛合金激光沉积制造热累积与熔池形貌演化

钦兰云<sup>1</sup>, 徐丽丽<sup>1</sup>, 杨光<sup>1</sup>, 刘奇<sup>2</sup>, 王维<sup>1</sup>

(1. 沈阳航空航天大学 航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 辽宁 沈阳 110136)

(2. 首都航天机械公司, 北京 100076)

**摘要:** 为了研究激光沉积制造过程热累积对熔池形貌的影响, 利用有限元软件对单道多层激光沉积制造 TA15 钛合金过程三维温度场进行数值模拟, 得到不同沉积层上的节点热循环特性、熔池温度分布规律以及熔池形貌变化, 结果表明沉积过程存在着热累积现象会使熔池面积逐渐变大。并通过对激光沉积过程熔池进行实时监测的试验对模拟进行了验证, 结果显示热累积直接影响沉积层上熔池的宽度以及倾斜角度, 且自一定层数之后, 熔池温度和熔池宽度逐渐趋于稳定。实验结果和模拟结果吻合较好。

**关键词:** 激光沉积制造; 熔池; 热累积; 数值模拟; 熔池倾角

中图分类号: TG146.2\*3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)09-2645-06

激光沉积制造 (Laser deposition manufacturing, LDM) 是一种金属增材制造技术, 因其对基体的热影响区小和稀释率低, 且材料利用率高、加工周期短、制件性能高等独特技术优势, 被誉为“变革性”、“控形/控性”一体化制造技术<sup>[1-4]</sup>, 近年来已获得国内外学者的广泛研究并在众多领域取得了重要应用<sup>[5-7]</sup>。在激光沉积制造过程中, 高功率激光束与金属粉末和基材交互作用产生熔池, 且熔池形貌的演变行为不仅受到激光功率、扫描速度、送粉速率等工艺参数的影响, 还与基体和已沉积层的热分布及热量累积有关<sup>[8,9]</sup>。而熔池的形成是激光沉积制造的关键, 熔池的形貌直接影响制件的几何尺寸, 从而影响制件的成形精度, 因此深入研究熔池的形貌演变规律是很有必要的<sup>[9,10]</sup>。炽热的液态熔池是一个自发光体, 高速摄像机可实时记录熔池的形貌, 红外热像仪可获取熔池及其附近区域的温度信息。目前, 国内外学者致力于建立基于熔池或温度的实时监控系统, 使激光沉积制造向着高精度、高效率 and 自适应闭环控制方向发展。Sörn Ocylok<sup>[11]</sup>等采用 CMOS 摄像机在线捕捉激光沉积过程熔池图像, 通过控制变量的方法对沉积过程中激光功率、扫描速度、基板预热等工艺参数与熔池几何参数的关系进行了研究, 发现在影响熔池形貌的工艺参数中, 激光功率的影响效果最为明显, 并提出通过实时改变激光功率以保证沉积层成形精度的自适应控制方法。

Dichen Li<sup>[12]</sup>等详细分析了不同扫描方式下制件边缘熔池受力情况与沉积层塌陷的关系, 并通过分析沉积试样的边界熔池倾角, 得出熔池倾角是由于相邻沉积层的搭接导致的, 且当熔池倾角达到一定极限时, 沉积层边缘开始出现塌陷现象, 严重影响沉积层的成形精度。M. Labudovic<sup>[13]</sup>等采用 ANSYS 参数化设计语言建立了激光沉积制造三维数值模拟模型, 计算了熔池区域的瞬态温度分布、残余应力以及熔池尺寸, 并通过高速摄像机实时拍摄熔池的形貌, 发现随着沉积层数的增加热累积对熔池高度的影响逐渐减小, 并提出了建立一个基于温度传感器和视觉传感器的激光沉积制造在线监测系统的可能性。Parisa Farahmand<sup>[14]</sup>等采用数值模拟和实验结合的方法对单道和多道单层沉积层熔池进行了对比分析, 用高速相机进行了实试验证, 并研究了扫描速度对熔池形态的影响。Hua Tan<sup>[15]</sup>等采用双色红外温度计对激光沉积过程中的熔池温度进行了实时跟踪和定点测量, 并讨论了各工艺参数对熔池热行为的影响, 以及沉积层厚度与熔池温度的关系。可见对熔池形貌特征及激光沉积热行为的研究已引起国内外学者的高度重视, 研究结果均表明工艺参数的改变及相互影响可造成基体与沉积层不均匀的热分布, 而热应力以及热累积不仅影响熔池的尺寸, 也直接影响沉积层的形貌, 从而影响制件的加工精度。但目前对激光沉积制造过程熔池热行为与熔池形貌的演变规律还不够明晰。

收稿日期: 2016-09-07

基金项目: 国家自然科学基金 (51505301, 51375316); 辽宁省自然科学基金 (2015020118); 国家重点研发计划 (2016YFB1100504)

作者简介: 钦兰云, 女, 1977年生, 博士, 副教授, 沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 辽宁 沈阳 110136, 电话: 024-89723852, E-mail: qinly@sau.edu.cn

本研究将对单道多层往复扫描TA15钛合金激光沉积制造过程进行温度场数值模拟，并采用 CCD 工业相机实时拍摄熔池图像，通过专用数字图像处理软件有效提取熔池宽度值，实验与模拟结果对比分析以验证激光沉积热累积对熔池形貌的影响，为实现熔池形貌的实时监控以提高激光沉积制件成形精度提供理论基础。

### 1 激光沉积制造过程数值模型的建立

激光沉积制造是个多因素影响的过程，制造过程中工艺参数匹配不当、同步送粉器粉末汇聚不良等现象都会导致成形制件出现内部缺陷或者成形精度差现象<sup>[16]</sup>。实验过程中发现，合理选择工艺参数可减少甚至避免成形制件内部缺陷，但是并不能保证制件的成形精度，这是因为沉积各点经历了热循环加热使沉积层中存在热累积效应，导致即使在工艺参数恒定的情况下，成形制件的尺寸精度也很难保证。而采用实验的手段获得沉积制造过程中同一制件不同层上定点的温度变化过程十分困难，需要在各实验条件完全相同的情况下进行多次实验，误差的存在不可避免，而数值模拟可解决此类问题。采用 ANSYS 有限元模拟软件的参数化设计语言建立单道多层激光沉积制造热耦合过程有限元数值模型，通过有限元中的“单元生死”技术<sup>[17]</sup>实现激光同步送粉逐层沉积的过程，并选用高斯热源模型以满足激光热源的能流密度分布特性。为了不影响温度场数值计算结果，需做出必要的假设以适当简化数学模型从而避免一些典型的非线性瞬态问题的出现，假设如下：(1) 沉积粉末材料和基板材料均各向同性；(2) 不考虑熔池内的化学反应以及液态熔池内流体的流动作用；(3) 激光沉积制造过程中只有基材和粉末之间存在热传导，将对辐射换热耦合到对流换热中且只有边界与空气间发生对流换热；(4) 粉末和基板的初始温度都是室温 (20 °C)；(5) 忽略粉末材料和基板材料的汽化。

激光沉积制造有限元模型如图 1 所示，模型由基材(210 mm×45 mm×6 mm)和沉积层(40 mm×4 mm

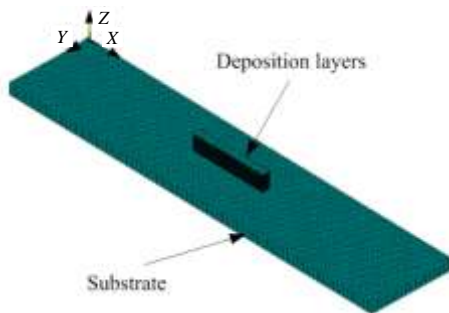


图 1 激光沉积制造有限元模型

Fig.1 FE model for LDM

×9 mm) 两部分组成，共沉积 30 层。材料均为 TA15 钛合金，其部分热物性参数见表 1。模拟采用的激光沉积工艺参数为：激光功率 1400 W，扫描速度 7 mm/s，光斑直径 4 mm，沉积层厚 0.3 mm。网格单元类型选用 SOLID70，可满足温度场模拟的要求，以 1 mm×1 mm×0.3 mm 为基本单元对沉积层进行网格划分，以 1 mm×1 mm×1 mm 为基本单元对基材进行网格划分。扫描方式为单向往复扫描，节点 1~6 分别位于第 5，10，15，20，25，30 层沉积层上，如图 2 所示。

### 2 实验

激光沉积制造实验是在沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室建立的激光沉积制造设备上完成的。光源为 IPG 光纤激光器，最大输出功率为 6 kW，沉积实验在氩气气氛保护工作室中进行，氧气的含量(体积分数)在 1×10<sup>-4</sup> 以下。基材为锻造退火态 TA15 钛合金，沉积金属粉末为 TA15 球形粉，粒径为 44~149 μm，其名义化学成分为 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V，粉末质量分数(%) 见表 2。实验前将基材进行研磨以去除表面氧化层，再用丙酮进行清洗，TA15 粉末经过 120 °C 真空下烘干备用。激光沉积工艺

表 1 TA15 钛合金粉末的部分热物性参数

Table 1 Thermo-physical parameters of TA15 titanium alloy

| Tempera-<br>ture, T/ °C | Density,<br>ρ/kg m <sup>-3</sup> | Thermal<br>conductivity,<br>λ/W m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> | Specific heat<br>capacity,<br>C/J kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> | Coefficient of<br>thermal expan-<br>sion, α/×10 <sup>-5</sup> ·°C <sup>-1</sup> |
|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 20                      | 4450                             | 8                                                                 | 520                                                                  | 0.9                                                                             |
| 200                     | 4450                             | 10.2                                                              | 587                                                                  | 0.9                                                                             |
| 400                     | 4450                             | 12.2                                                              | 670                                                                  | 0.9                                                                             |
| 600                     | 4450                             | 15.1                                                              | 755                                                                  | 0.94                                                                            |
| 1540                    | 4450                             | 25                                                                | 1162                                                                 | 0.97                                                                            |
| 1650                    | 4450                             | 22                                                                | 1200                                                                 | 0.97                                                                            |
| 2000                    | 4450                             | 20.5                                                              | 1200                                                                 | 0.97                                                                            |

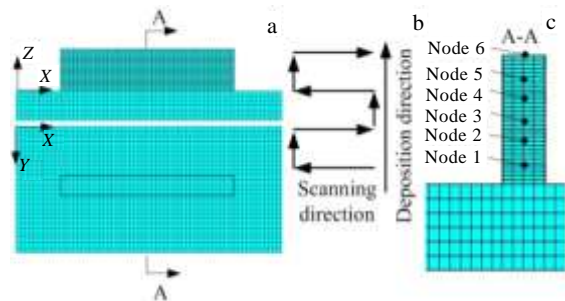


图 2 节点位置示意图

Fig.2 Schematic diagram nodes location: (a) mesh division, (b) scanning pattern and deposition direction, and (c) location of nodes

表 2 TA15 钛合金粉末的主要成分

| Table 2 Composition of TA15 titanium alloy powder ( $\omega/\%$ ) |         |          |         |      |
|-------------------------------------------------------------------|---------|----------|---------|------|
| Al                                                                | Zr      | Mo       | V       | Ti   |
| 5.5~7.1                                                           | 1.5~2.5 | 1.05~2.0 | 0.8~2.5 | Bal. |

参数为：焦距 300 mm，光斑直径约 4 mm，激光功率 1400 W，扫描速度 7 mm/s，载气气压 0.3 MPa，载气流量 6 L/min，送粉速率 5.2 g/min。实验选用 CCD 工业相机实时拍摄熔池图像，采用 DIAS-DG40N 型红外测温仪对熔池温度进行检测，其测量精度为  $\pm 0.5\%$ ，测温范围为 500~3000  $^{\circ}\text{C}$ ，图 3 为基于工业相机和红外测温仪的激光沉积制造过程实时监测系统。利用线切割机沿沉积件 A-A 面（图 2）切开得到待观察试样，试样经镶嵌、打磨和抛光后用 Kroll 腐蚀液( $\text{HF-HNO}_3\text{-H}_2\text{O}$  溶液，体积比为 1:6:7) 进行腐蚀，并采用光学显微镜对待观察试样进行宏观形貌的观察。

### 3 结果与分析

#### 3.1 沉积层各节点热循环及熔池温度分布

图 4 为温度场数值模拟得到的横截面 A-A（图 2）上各节点的温度变化曲线，可以看出，沉积层上各节

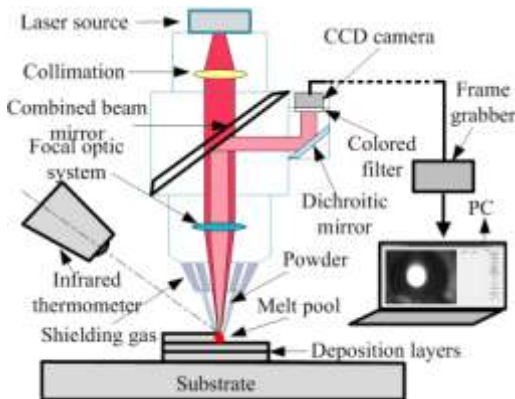


图 3 实时监测系统

Fig.3 Online real time monitoring system

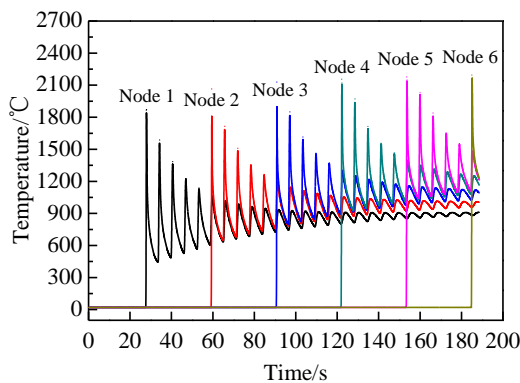


图 4 各节点热循环

Fig.4 Thermal cycle of different nodes

点温度随时间近似呈周期性波动，每当激光热源照射到节点正上方时，节点温度就会达到一次峰值。由于激光热源的能量分布集中且范围较小，所以峰值变化过程迅速。随着热源距节点的距离增大，节点的温度峰值逐渐降低但温度谷值缓慢上升，温度峰值和谷值的差值逐渐减小，当距离达到一定值时，节点温度趋于稳定，在较小的温度范围内上下波动。对比不同沉积层上的节点温度变化曲线可见，节点 1~6 达到的首个温度峰值分别为 1873、2065，2130，2157，2177，2195  $^{\circ}\text{C}$ ，即在工艺参数不变的情况下，位于层数越高的节点首次达到的温度峰值越高，且节点温度达到稳态时的温度峰值和谷值越高，这是因为在最初沉积制造的过程中，基材处于室温状态，沉积过程中一部分的热量近乎垂直向下传至基材，另一部分沿着基材表面向周围散热，此时热量传递较快，已沉积层间热量累积较少，温度较低。而随着沉积层数的逐渐增加，热传递的方式发生了变化，主要是通过已沉积层向下传导，热量在已沉积层间大量累积，导致新沉积层的传热变得缓慢，温度逐渐升高<sup>[18]</sup>。

图 5a~5f 为第 5，10，15，20，25，30 层上中间载荷步处于激光光斑照射范围内沉积层温度分布，当温度达 TA15 钛合金粉末熔点（约 1650  $^{\circ}\text{C}$ ）时才能形成液态熔池，图中虚线近似于熔池边缘，可见沉积层越高，其高温分布范围越大，熔池面积越大，图 5f 显示实际熔池尺寸已大于光斑直径，表明熔池的面积不仅与光斑直径及工艺参数有关，还受到沉积过程热累积的影响。

图 6 为对激光沉积制造第 5 层沉积过程熔池表面温度实时跟踪测量结果，熔池表面实测温度平均值为 1828  $^{\circ}\text{C}$ ，而数值模拟第 5 层最高温度平均值为 1863  $^{\circ}\text{C}$ ，两者误差为 2%，数值模拟结果与实际吻合较好。

#### 3.2 激光沉积熔池形貌演变

图 7 为 TA15 钛合金激光沉积试样的宏观照片，试样名义尺寸与建立的三维有限元模型尺寸相同，沉积工艺参数与数值模拟参数保持一致。单道多层试样呈现两端略高，下窄上宽的形貌。测量得第 5，10，15，20，25，30 层沉积层宽度分别为 4.17，4.44，4.83，4.94，5.11，5.16 mm，第 5 层和第 30 层的层宽相差 1 mm，成形精度较低。考虑到工作台在沉积层起始和终止端存在加速和减速过程，而速度起伏会影响熔池吸收的能量密度，进而影响熔池形貌，因此测量的熔池和沉积层位置选择在工作台匀速段以排除速度起伏对熔池形貌的干扰。

图 8a~8f 分别为工业相机拍摄到的第 5，10，15，

20, 25, 30 层沉积层匀速段同一位置处的熔池图像。

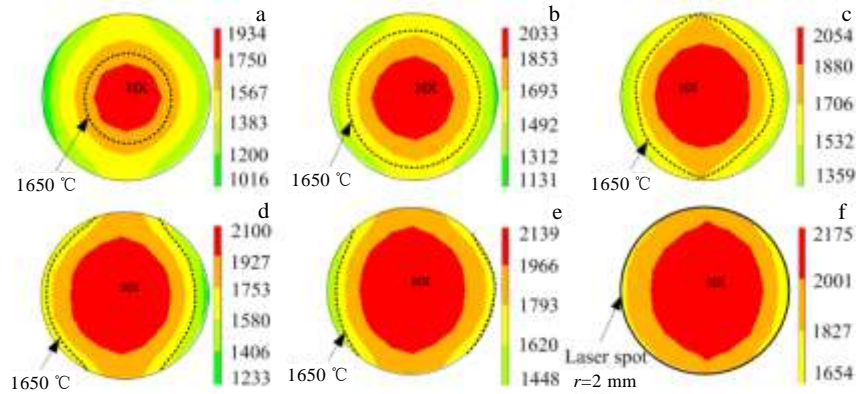


图 5 不同沉积层上熔池温度分布

Fig.5 Temperature distribution of melt pool on different deposition layers (°C): (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25, and (f) 30

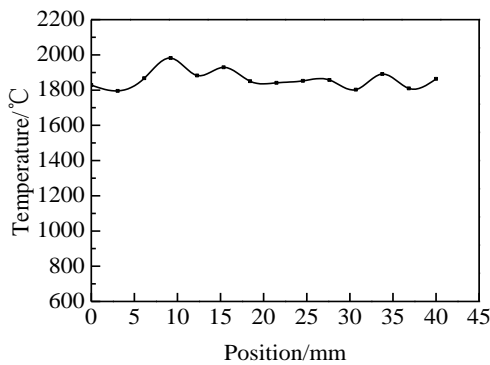


图 6 红外热成像仪跟踪测量温度结果

Fig.6 Temperature result of tracking measurement by infrared Thermometry

利用专用数字图像处理软件提取图 8 中熔池的宽度值分别为 4.38, 4.84, 5.01, 5.16, 5.21, 5.25 mm, 熔池随着层数的增加逐渐变宽。图 9 清晰可见熔池宽度



图 7 沉积试样宏观形貌

Fig.7 Macrograph of the deposited sample

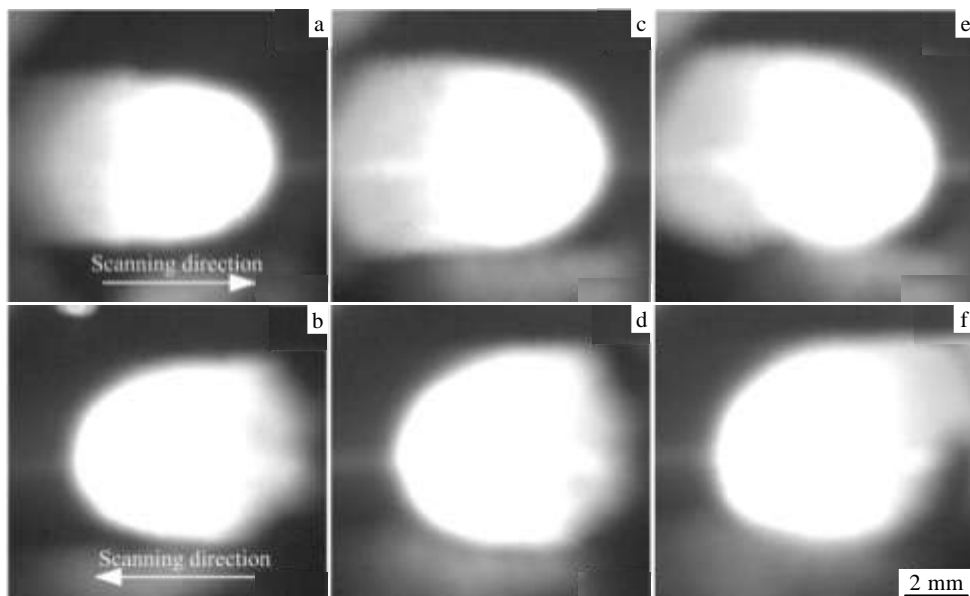


图 8 不同沉积层上同一位置的熔池图像

Fig.8 Topside images of melt pool at the same position on different deposition layer: (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25, and (f) 30

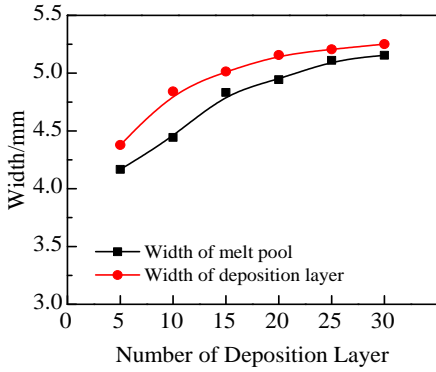


图 9 同一位置上不同沉积层熔池宽度与沉积层宽度对比

Fig.9 Comparison of deposition layer width and melt pool width at the same position

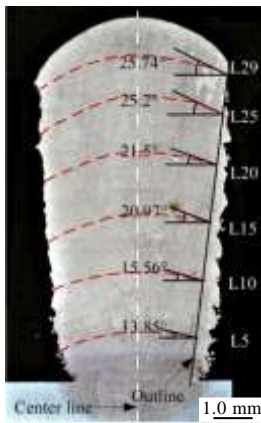


图 10 试样 A-A 横截面宏观图

Fig.10 Macroscopic of A-A cross section of sample

与沉积层宽度都随着沉积层数的增加逐渐增大，且沉积 15 层之后二者增幅都逐渐减小，二者变化趋势同层间热累积变化趋势一致，表明随着热累积增加，单位

时间内熔池吸收能量增多，温度升高，从而熔池捕获粉末能力增强，单道宽增加。但随着热累积逐渐趋于稳定，熔池输入和输出热量不断平衡，从而熔池温度、宽度、捕获粉末能力以及沉积层宽度逐渐趋于稳定。

图 10 为光学显微镜下试样 A-A 横截面 (图 2) 宏观图，清晰可见层带线为不规则的圆弧线，取沉积层有效轮廓与各层带线的交点，定义该点处层带线的切线与水平方向夹角为熔池倾角，可见位于层数越高的熔池倾角越大。这是因为已沉积层上的液态熔池内部存在着复杂的流动性，且液态熔池受到重力、熔池表面张力以及气固两相流等作用力影响，使液态熔池分布不均匀<sup>[12]</sup>。同时，激光束能量和粉末均类似服从高斯分布，熔池中央激光能量密度较高，温度较高，到达熔池粉末量较多，远离熔池中心能量密度和粉末密度逐渐衰减，因此层带线呈现中间突出的圆弧状，且随着层数增多，层带线中间凸出越明显，因此熔池倾角越大。图 11 为熔池及熔池倾角示意图，假设层带线为以中心线对称的规则圆弧，圆心在中心线上，相邻两层带线圆心距离  $O_1O_2$  为 Z 轴的抬升量 (Z step)，且两层带线的边缘垂直距离 AC 也为一个抬升量，沉积层实际轮廓线可简化为一条倾斜的直线 BC，理论轮廓线为与  $O_1O_2$  平行的直线 AC，图 11b 中  $r_1$  和  $r_2$  为相邻两层带线的圆弧半径， $l_1$  和  $l_2$  分别为相邻两层带线在与实际轮廓交点处的切线，因此  $\alpha_1 + \theta_1 = \alpha_2 + \theta_2 = 90^\circ$ ，其中  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  分别为相邻两层熔池倾角， $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为圆弧半径与水平线夹角， $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  分别为圆弧半径与沉积层实际轮廓线夹角， $\beta_0$  为线段  $O_1A$  与实际轮廓线夹角，因线段  $O_1A$  与线段  $r_2$  平行，因此  $\gamma_2 = \beta_0$ ，且  $\alpha_1 + \gamma_1 = \alpha_2 + \gamma_2$ ， $\gamma_1 < \beta_0$ ，因此  $\gamma_1 < \gamma_2$ ， $\theta_1 < \theta_2$ ，可见由于热累积产生的熔池宽度的逐渐增大会直接影响液态熔池的形貌变化，使熔池倾角逐层增大。

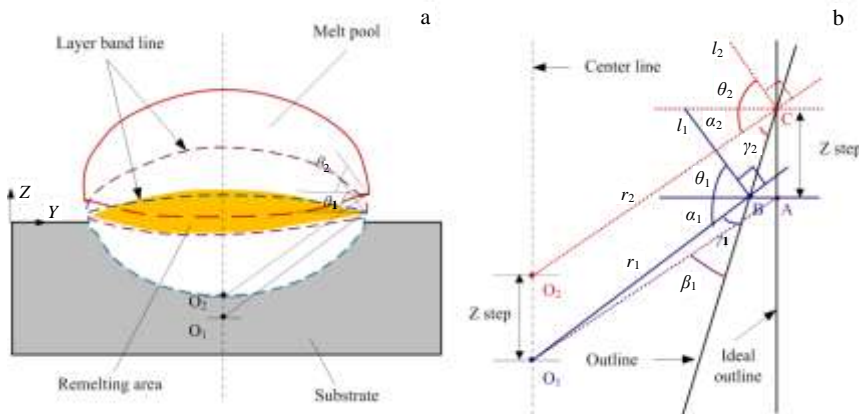


图 11 熔池倾角变化示意图

Fig.11 Schematic diagram of melt pool inclination variation: (a) melt pool and (b) melt pool inclination

## 4 结 论

1) 模拟结果显示, 工艺参数恒定的情况下, 随着沉积层数的增加, 热量逐渐累积, 新沉积层上形成的熔池面积逐渐变大, 但热量从一定层数之后累积速度逐渐减缓。

2) 实验结果显示, 热累积导致熔池温度及宽度逐渐增大, 但沉积一定层数后, 随着热累积逐渐趋于稳定, 熔池宽度增幅逐渐减小, 且沉积层宽度变化与熔池宽度变化一致。实验与模拟的结果具有较好的一致性。

3) 沉积过程中, 熔池温度逐层增加会使熔池粉末捕获能力及熔池倾角变大, 从而影响制件外形尺寸。

### 参考文献 References

- [1] Cho Chongdu, Zhao Guiping, Kwak Si-Young *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2004, s153-154(1): 494
- [2] Shi Qimin, Gu Dongdong, Xia Mujian *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2016, 84: 9
- [3] Gong Shuili(巩水利), Suo Hongbo(锁红波), Li Huaixue(李怀学) *et al. Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2013, 13: 66
- [4] Wang Huaming(王华明). *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*(航空学报)[J], 2014, 35(10): 2690
- [5] Wang Huaming(王华明). *Defense Manufacturing Technology* (国防制造技术)[J], 2013, 3: 5
- [6] Tan Hua, Chen Jing, Zhang Fengying *et al. International Journal of Machine Tools & Manufacture*[J], 2010, 50(1): 1
- [7] Lu Bingheng(卢秉恒), Li Dichen(李涤尘). *Machine Building & Automation*(机械制造与自动化)[J], 2013, 42(4): 1
- [8] Ding Yaoyu, Warton James, Kovacevic Radovan. *Additive Manufacturing*[J], 2016, 10: 24
- [9] Frank Liou, Kevin Stattery, Mary Kinsella *et al. Rapid Prototyping Journal*[J], 2007, 13(14): 236
- [10] Yu Jun, Lin Xin, Wang Junjie *et al. Applied Surface Science* [J], 2010, 256(14): 4612
- [11] Ocylok Sörn, Alexeev Eugen, Mann Stefan *et al. Physics Procedia*[J], 2014, 56: 228
- [12] He Bin, Li Dichen, Zhang Anfeng *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2013, 48(11): 171
- [13] Labudovic M, Hu D, Kovacevic R. *Journal of Materials Science*[J], 2003, 38(1): 35
- [14] Parisa Farahmand, Radovan Kovacevic. *Optics & Laser Technology*[J], 2014, 63(4): 154
- [15] Tan Hua, Chen Jing, Lin Xin *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2008, 198(1): 454
- [16] Nickel A H, Barnett D M, Prinz F B. *Materials Science & Engineering A*[J], 2001, 317(1-2): 59
- [17] Long Ri-sheng, Liu Weijun, Xing Fei *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2008, 380-384(4): 4327
- [18] Yang Guang(杨光), Ding Linlin(丁林林), Qin Lanyun(钦兰云) *et al. High Power Laser and Particle Beams*(强激光与粒子束)[J], 2014, 26(11): 1190 021

## Correlations of Thermal Accumulation and Melt Pool Geometry during Laser Deposition Manufacturing of Titanium Alloy

Qin Lanyun<sup>1</sup>, Xu Lili<sup>1</sup>, Yang Guang<sup>1</sup>, Liu Qi<sup>2</sup>, Wang Wei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

(2. Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In order to study the effect of thermal accumulation of laser deposition manufacturing (LDM) process on melt pool geometry, a three-dimensional (3D) multi-layer model for LDMed TA15 titanium alloy was developed to discover thermal cycle characteristics, temperature distribution of melt pool and melt pool geometry. Results show that melt pool width increases gradually with the increase of deposition layer because of thermal accumulation. The numerical results are validated by experimental-measured values collected by *in-situ* monitoring techniques. Thermal accumulation is strongly correlated to melt pool width and melt pool inclination; however, melt pool temperature and width become stable gradually after a certain number of layers. The experimental data and model prediction are in good agreement.

**Key words:** laser deposition manufacturing; melt pool; thermal accumulation; numerical simulation; melt pool inclination

