

# 金属激光增材制造层间偏移量对熔池温度的影响

来佑彬<sup>1</sup> 赵宇辉<sup>2</sup> 王冬阳<sup>1</sup> 杨波<sup>1</sup>

(1.沈阳农业大学工程学院,辽宁 沈阳 110866 2.中国科学院沈阳自动化研究所,辽宁 沈阳 110016)

**摘要** 金属激光增材制造过程中熔池温度变化对加工质量具有重要影响,为研究 Hastelloy C-276 合金球形粉末激光增材制造层间偏移量对熔池温度的影响情况,搭建了熔池温度实时监测系统。采用非接触式红外测温手段测量了不同层间偏移量薄壁件加工过程中熔池温度变化情况。结果表明,不同层间偏移量倾斜薄壁加工过程中熔池温度变化有相似规律,即开始时温度急剧增大,后继续增大至峰值点,进而缓慢减小,最后基板温度累积效应和环境的影响达到平衡,倾斜薄壁熔池温度趋于稳定。另外,熔池截面面积随着层间偏移量的增大而增大,熔池捕获金属粉末的能力随之增强,受此影响,熔池平均温度与层间偏移量呈负相关关系。

**关键词** 增材制造;偏移量;熔池;温度;Hastelloy C-276 合金

中图分类号:TH16;TG146.2 文献标识码:A 文章编号:1001-3997(2019)09-0112-03

DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.2019.09.028

## Influence of Offset Between Layers on Molten Pool Temperature in Metal Laser Additive Manufacturing

LAI You-bin<sup>1</sup>, ZHAO Yu-hui<sup>2</sup>, WANG Dong-yang<sup>1</sup>, YANG Bo<sup>1</sup>

(1.School of Engineering Shenyang Agricultural University, Liaoning Shenyang 110866, China;

2.Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Liaoning Shenyang 110016, China)

**Abstract** In metal laser additive manufacturing, the molten pool temperature has a significant impact on the quality of the finished parts. In order to investigate the effect of the offset between layers on molten pool temperature in Hastelloy C-276 alloy spherical powder laser additive manufacturing, a real-time monitoring system was builded. The influence of the offset on the molten pool temperature was measured by a non-contact infrared temperature measurement. It was found that the change of molten pool temperature in the thin-walled process with different offset has a similar rule. At first, the temperature increases sharply to the peak, then decreases slowly, and finally, the temperature tends towards stability with the balance of the substrate temperature cumulative effect and the environmental impact. In addition, the cross-sectional area of the pool increases with the offset between layers increasement, and the ability to capture metal powder is enhanced at the same time. Therefore, the molten pool average temperature is negative correlation with the offset between layers.

**Key Words** Additive Manufacturing; Offset; Molten Pool; Temperature; Hastelloy C-276 Alloy

## 1 引言

金属激光增材制造(Metal laser additive manufacturing, AM)技术是近20年来信息技术、新材料技术与制造技术多学科融合发展的先进制造技术。该技术是一种通过逐层叠加材料的方式构造实体的先进制造技术<sup>[1]</sup>。很多金属零部件都具有侧壁倾斜的几何特征,即侧壁与垂直面之间存在一定的角度,例如航空发动机尾喷管、汽轮机叶片等<sup>[2]</sup>。对于金属零件斜壁增材制造,由于支撑材料、工艺局限等诸多因素的影响,在增材制造过程中很难添加支撑<sup>[3]</sup>。在3轴CNC数控金属激光增材制造系统,倾斜薄壁件的制造采用的是水平方向层间偏移的方法进行多层堆积<sup>[4]</sup>。当倾斜角度较小时,合理的控制工艺参数,通过改变层间偏移量可以获得质量较为理想的的不同倾斜角度的薄壁件。

熔池的温度变化对金属激光增材制造过程具有非常重要的影响,在熔化、凝固及连续冷却过程中,熔池温度直接影响材料凝固组织形态及固态相变组织结构,从而最终决定组织形态以及各种缺陷分布<sup>[5]</sup>。目前金属激光增材制造熔池温度方面的报道多集中在以数值模拟的方法研究温度场、热力耦合场的演化方面<sup>[6]</sup>。对于试验方面的研究,特别是层间偏移量对熔池温度影响方面的研究未见报道。通过试验手段,深入研究了金属激光增材制造层间偏移量对熔池温度的影响情况,研究结果为较小倾斜角度薄壁件的增材制造参数优化提供了依据。

## 2 层间偏移量与倾斜角度

金属激光增材制造单道件横截面照片,如图1所示。由于激光加工时熔池中液态金属的表面张力和重力作用,造成激光加工

来稿日期:2019-01-17

基金项目:国家自然科学基金(51605311) 辽宁省教育厅科学研究重点项目(LSNZD201603) 沈阳市科技计划项目(17-231-1-65)

作者简介:来佑彬(1988-)男,山东济宁人,博士研究生,硕士生导师,讲师,主要研究方向:金属高能束熔覆增材制造技术

层团聚<sup>[7]</sup>,故单道件横截面可以近似的看作半径为  $r$  的圆弧,图中  $H$  代表单道高度, $W$  表示单道宽度。

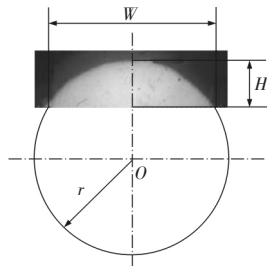


图 1 单道熔覆层横截面照片

Fig.1 Cross Section Photograph of Single Channel Cladding Layer

在金属激光增材制造中  $Z$  轴增量对加工质量有着决定性影响,因此合理确定  $Z$  轴增量很关键,这里按照如下公式对  $Z$  轴增量  $\Delta z$  进行计算<sup>[8]</sup>:

$$\Delta z = \frac{\left(\frac{4H^2 + W^2}{8H}\right)^2 \cdot \arcsin\left(\frac{4WH}{4H^2 + W^2}\right) - W^2 - 4H^2}{16H} \quad (1)$$

试验测得  $W=3.19\text{mm}$ ,  $H=1.56\text{mm}$ ,由(1)式求得  $\Delta z=1.2\text{mm}$ 。

薄壁倾斜件示意图如图 2 所示。这里假定  $\Delta z$  始终与实际单层高度相匹配,即离焦量不变。图中  $\delta$ —层间偏移量  $\theta$ —倾斜角  $O_1, O_2$ —相邻两层近似圆弧圆心。由图可知:

$$\theta = \arctan \frac{\delta}{\Delta z} \quad (2)$$

因此,在  $\Delta z$  确定的情况下,层间偏移量  $\delta$  将直接决定倾斜角的大小。

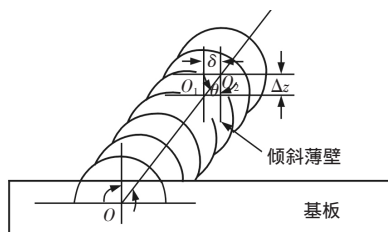


图 2 薄壁倾斜件示意图

Fig.2 Sketch of Thin Wall Inclined Parts

大量试验发现,层间偏移量不能过大,否则将出现成形层悬伸端产生塌陷的现象,导致连续成形加工进程的被迫中断。根据经验选定层间偏移量取值范围为  $(0.05\sim 0.25)\text{mm}$ 。

### 3 实验

#### 3.1 增材制造系统及加工参数

试验在中科院沈阳自动化研究所激光增材制造系统上进行,如图 3 所示。所采用的工艺参数,如表 1 所示。

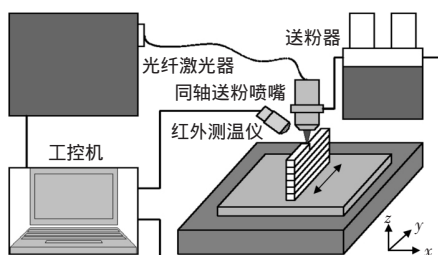


图 3 激光增材制造系统示意图

Fig.3 Sketch Map of Laser Additive Manufacturing System

表 1 激光增材制造工艺参数  
Tab.1 Process Parameters of Laser Additive Manufacturing

参数名称	数值
激光功率 $P/\text{kW}$	1.1
扫描速度 $v_s/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	6
送粉速度 $v_p/\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$	10
光斑直径 $D/\text{mm}$	3
单层宽度 $W/\text{mm}$	3.19
单层高度 $H/\text{mm}$	1.56
$Z$ 增量 $\Delta z/\text{mm}$	1.2
偏移量 $\delta/\text{mm}$	0.05~0.25

基板材料为 45 号钢,实验前先将基板打磨抛光,以便去除表面氧化皮层并增加其表面光洁度,然后用丙酮对其做进一步的清洗处理<sup>[9]</sup>,粉末材料为 Hastelloy C-276 合金球形粉末,粒度为  $(-100\sim +300)$ 目化学成分,如表 2 所示。试验前在  $120\text{ }^\circ\text{C}$  真空环境下进行干燥处理。

表 2 Hastelloy C-276 合金粉末化学成分  
Tab.2 Hastelloy C-276 Alloy Powder Chemical Composition

成分	质量分数(wt%)
Cr	16
Mo	15.7
C	0.004
Si	0.03
Mn	0.5
P	0.01
Co	0.1
W	3.3
Fe	5.6
V	0.35
Ni	Bal

#### 3.2 扫描路径

根据单道多层薄壁件激光增材制造经验,设计出加工路径,如图 4 所示。图中虚线部分代表关激光扫描,实线部分代表开激光扫描,加工层数为 60。

$$L_{AB}=L_{CD}=L_{EF}=L_{GH}=5\text{mm} \quad L_{BC}=L_{FG}=50\text{mm}$$

式中  $L_{AB}, L_{BC}, L_{CD}, L_{EF}, L_{FG}, L_{GH}$ — $AB, BC, CD, EF, FG, GH$  线段长度。

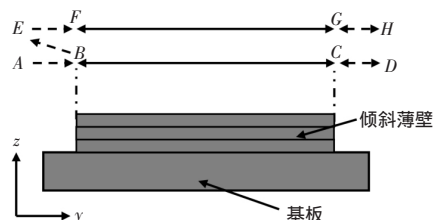
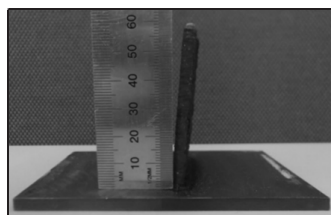


图 4 扫描路径示意图

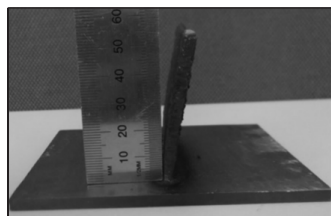
Fig.4 Schematic Diagram of Scanning Path

#### 3.3 温度实时监测

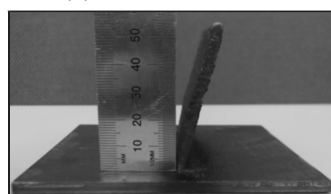
试验中对不同层间偏移量样件制造过程进行实时温度测量,测温系统采用德国某公司 Pyrospot DG40N 型号红外测温仪,该测温仪量程为  $(500\sim 3000)\text{ }^\circ\text{C}$ ,增材制造出的不同层间偏移量样件,如图 5 所示。



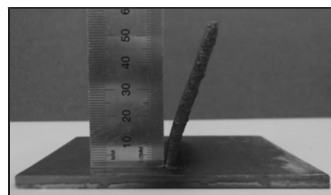
(a)层间偏移量  $\delta=0.05\text{mm}$



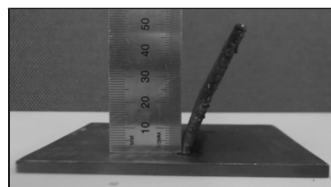
(b)层间偏移量  $\delta=0.1\text{mm}$



(c)层间偏移量  $\delta=0.15\text{mm}$



(d)层间偏移量  $\delta=0.2\text{mm}$



(e)层间偏移量  $\delta=0.25\text{mm}$

图5 不同层间偏移量样件

Fig.5 Sample Migration Between Different Layers

## 4 实验结果与分析

### 4.1 不同层间偏移量样件温度情况

为比较不同层间偏移量对熔池温度的影响,提取出各样件加工过程中前30层温度测量结果,为了便于分析,对各偏移量测温结果求均值结果,如图6所示。

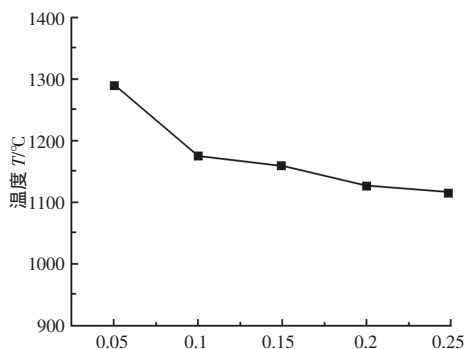


图6 前30层温度均值

Fig.6 The Average Temperature of the First 30 Layers

### 4.2 试验结果分析

分析可知,不同层间偏移量倾斜薄壁的温度分布有相似的规律,即开始时温度急剧增大,后继续增大至峰值点,进而缓慢减小,最后趋于平稳状态。究其原因,开始时激光直接落在基板上,基板的温度相对于加工层非常低,因此测得的温度较低,随着加工的进行,基板不断被加热,热量迅速累加,因此温度陡增至峰值处,后随着金属粉末不断熔入,熔池温度逐渐减小,最后基板温度累积效应和环境的影响达到平衡,倾斜薄壁温度达到稳定。

由图6可知,随着层间偏移量的增大,平均温度逐渐减小。可以根据图7求出单层加工截面面积  $S$  为:

$$S = \left( \pi - 2\arccos \frac{\sqrt{\delta^2 + \Delta z^2}}{2r} \right) \cdot r^2 + \frac{\sqrt{(\delta^2 + \Delta z^2)(4r^2 - \delta^2 - \Delta z^2)}}{2} \quad (3)$$

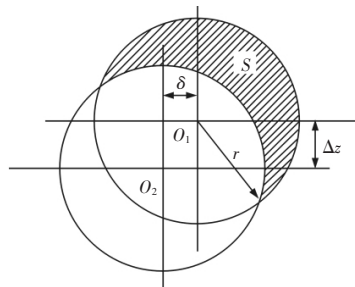


图7 单层加工截面面积

Fig.7 Single Machined Section Area

由式(3)可知,单层加工截面面积  $S$  随着层间偏移量  $\delta$  的增大而增大。因此,随层间偏移量的增大,熔池将增大,熔池捕获金属粉末的能力随之增强。由于粉末进入熔池前仍保持其固相颗粒状态<sup>[10]</sup>,其温度相对于熔池要低的多,相当于给熔池施加一个冷却源,进入熔池的粉末越多,粉末熔化所吸收的能量就越多,粉末对熔池的冷却作用就越显著。所以,随着层间偏移量的增大,平均温度降低。

## 5 结论

(1)层间偏移量决定倾斜角度,层间偏移量受工艺限制,不能过大,可以通过改变层间偏移量获取较小倾斜角度零件。

(2)不同层间偏移量样件温度分布具有相似规律。

(3)熔池温度受金属粉末影响,单层加工截面面积与层间偏移量正相关,即偏移量越大倾斜薄壁件平均温度越低。

### 参考文献

[1] 陈从平,王小云,黄杰光.增材制造制备骨组织工程支架研究进展[J].机械设计与制造,2016(2):270-272.  
(Chen Cong-ping, Wang Xiao-yun, Huang Jie-guang. Research progress of additive manufacturing techniques in bone tissue engineering scaffold fabrication[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(2): 270-272.)

[2] 王续跃,江豪,叙文骥.变Z轴提升量法圆弧截面倾斜薄壁件激光熔覆成形研究[J].中国激光,2011,38(10):1-7.  
(Wang Xu-yue, Jiang Hao, Xu Wen-ji. Laser cladding forming of arc-section inclined thin-walled parts with variable z-increments [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(10): 1-7.)

[3] 尚晓峰,刘伟军,王维.金属粉末激光成形零件倾斜极限[J].机械工程学报,2007,43(8):97-100.

(下转第118页)

## 5 结论

提出并实验研究了一种摩擦力控制的多自由度机器人控制策略,由压电转换器和突发激励模式下的振荡来实现,首先建立了单激励力下的压电驱动机器人动力学模型,然后针对离心激励机器人及运动副自由度电磁控制策略进行了分析,最后研究了单一机器人精密轨迹规划算法及实验验证,不平衡单一旋转周期内和旋转周期为10次的实验结果表明,摩擦控制角越大,能够实现的位移越大,但是沿着X轴的偏差也会随之增大。通过研究,为少驱动多自由度的机器人研究提供基础。

## 参考文献

- [1] 王英,李瑞琴,张艳岗.多自由度运动链驱动件的自动识别[J].机械工程学报,2016(7):31-37.  
(Wang Ying, Li Rui-qin, Zhang Yan-gang. Self-identification of multi-degree-of-freedom kinematic chain drive[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016(7): 31-37.)
- [2] 代陈超,侯宇,尹志朋.仿生挖掘机器人结构设计与运动特性分析[J].机械设计与制造,2017(5):106-108.  
(Dai Chen-chao, Hou Yu, Yin Zhi-peng. Analysis of structural design and kinematic characteristics of bionic excavation robot[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2017(5): 106-108.)
- [3] 罗庆生,魏天骐,莫洋.多自由度模块化链节式8足机器人三总线控制系统设计[J].北京理工大学学报,2013,33(7):698-703.  
(Luo Qing-sheng, Wei Tian-qi, Mo Yang. Design of multi-degree-of-freedom modular chain 8-foot robot three-bus control system[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(7): 698-703.)
- [4] 郭瑞峰,李岩鹤,史世怀.关节型码垛机器人轨迹规划及运动学研究[J].机械设计与制造,2017(1):76-78.  
(Guo Rui-feng, Li Yan-he, Shi Shi-huai. Study on trajectory planning and kinematics of articulated palletizing robot[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2017(1): 76-78.)
- [5] 宗成星,陆亮,雷新宇.一种基于A\*算法的空间多自由度机械臂路径规划方法[J].合肥工业大学学报,自然科学版,2017,40(2):164-168.  
(Zong Cheng-xing, Lu Liang, Lei Xin-yu. A method for space multi-degree of freedom manipulator path planning based on A\* algorithm[J].

- Journal of Hefei University of Technology Natural Science Edition, 2017, 40(2): 164-168.)
- [6] Deimel R, Brock O.A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping[J].The International Journal of Robotics Research, 2016, 35(1-3): 161-185.
- [7] 孟韶南,梁雁冰,师恒.基于ROS平台的六自由度机械臂运动规划[J].上海交通大学学报,2016(1).  
(Meng Shao-nan, Liang Yan-bing, Shi Heng. Based on ROS platform six-degree-of-freedom manipulator movement planning[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016(1).)
- [8] Surdhar J S, White A S.A parallel fuzzy-controlled flexible manipulator using optical tip feedback[J].Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2003, 19(3): 273-282.
- [9] 张庆利,王悦,张涛.多自由度空间机构模块化关节研究[J].机械与电子,2015(3):74-77.  
(Zhang Qing-li, Wang Yue, Zhang Tao. Research on modular joint of multi-degree-of-freedom spatial mechanism[J]. Machinery and Electronics, 2015(3): 74-77.)
- [10] 周浩.多自由度双足机器人步态控制策略研究[D].新疆:新疆大学,2015.  
(Zhou Hao. Study on gait control strategy of multi-degree-of-freedom bipedal robot[D]. Xinjiang: Xinjiang University, 2015.)
- [11] 丁维力,李红平,马志敏.两级升降多自由度机械臂设计及运动学[J].辽宁工程技术大学学报,自然科学版,2014,33(5):642-646.  
(Ding Wei-li, Li Hong-ping, Ma Zhi-min. Design and kinematics of two-stage multi-degree-of-freedom manipulator[J]. Journal of Liaoning Technical University, Natural Science Edition, 2014, 33(5): 642-646.)
- [12] Vinoth V, Singh Y, Santhakumar M. Indirect disturbance compensation control of a planar parallel (2-PRP and 1-PPR) robotic manipulator[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, 30(5): 556-564.
- [13] 王梦涛,张良安.六自由度机器人的运动学分析[J].安徽工业大学学报,自然科学版,2016,33(4):365-371.  
(Wang Meng-tao, Zhang Liang-an. Kinematics analysis of six-degree-of-freedom robot[J]. Journal of Anhui University of Technology, Natural Science Edition, 2016, 33(4): 365-371.)

(上接第114页)

- (Shang Xiao-feng, Liu Wei-jun, Wang Wei. Slope limit of part made in metal powder laser shaping [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 97-100.)
- [4] 江豪.倾斜薄壁结构件激光熔覆成形基础研究[D].大连:大连理工大学,2012.  
(Jiang Hao. Basic research on laser cladding forming of inclined thin-walled Parts[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.)
- [5] 贾文鹏,林鑫,陈静.空心叶片激光快速成形过程的温度/应力场数值模拟[J].中国激光,2007,34(9):1308-1312.  
(Jia Wen-peng, Lin Xin, Chen Jing. Temperature/Stress field numerical simulation of hollow blade produced by laser rapid forming[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(9): 1308-1312.)
- [6] 王福雨,刘伟军,赵宇辉.复杂薄壁零件激光快速成形过程的热力耦合场数值模拟[J].机械工程学报,2013,49(5):191-198.  
(Wang Fu-yu, Liu Wei-jun, Zhao Yu-hui. Thermo-mechanical coupling field simulation of complex thin-wall part laser rapid prototype process [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(5): 191-198.)
- [7] 张凯.激光直接成形金属零件的工艺研究[D].北京:中国科学院大学,2007.  
(Zhang Kai. Research on processing characteristics during laser metal deposition shaping technology[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2007.)
- [8] 朱刚贤,张安峰,李涤尘.激光金属制造薄壁零件Z轴单层行程模拟[J].焊接学报,2010,31(8):57-60.  
(Zhu Gang-xian, Zhang An-feng, Li Di-chen. Model of layer thickness of thin-walled parts in laser metal direct manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(8): 57-60.)
- [9] 来佑彬,张本华,赵吉宾.金属激光直接成形最佳搭接率计算及试验验证[J].焊接学报,2016(12):79-82+132-133.  
(Lai You-bin, Zhang Ben-hua, Zhao Ji-bin. The calculation and its experimental verification of optimal overlapping rate in laser metal direct manufacturing [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016 (12): 79-82+132-133.)
- [10] JOUVARD J M, GREVEY D F, LEMOINE F. Continuous wave Nd:YAG laser cladding modeling: A physical study of track creation during low power processing[J]. Journal of Laser Applications, 1997(9): 43-50.