

## 激光熔丝增材制造温度场的红外热像监测

朱进前<sup>1</sup>, 凌泽民<sup>1</sup>, 杜发瑞<sup>1</sup>, 丁雪萍<sup>2,3</sup>, 李慧敏<sup>1</sup>

- (1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045;
2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714;
3. 智能增材制造技术与系统重庆市重点实验室, 重庆 400714)

**摘要:** 为实现对增材制造成形件的精确控形控性, 必须要对其热过程有一定科学认识。以真空环境下激光熔丝增材制造单道成形为例, 利用红外热像技术对其热过程进行监测。比较分析送丝速度对温度场、热循环、冷却速率的影响规律, 利用红外热分析对其成形熔敷道宽度及缺陷开展研究。结果表明: 借助红外热像可实现对熔敷道温度场变化的监测, 沿熔敷道长度成形方向, 监测点对应最高温度和冷却速率分别呈现升高和降低趋势。随着送丝速度的增加, 熔敷道长度 1/4、2/4、3/4 处监测点对应的冷却速率随之减小。此外, 基于红外热分析可实现对熔敷道宽度预测以及对缺陷位置的定位。

**关键词:** 红外热像; 增材制造; 激光熔丝; 送丝速度

**中图分类号:** TG456.7   **文献标志码:** A   **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0604002

## Monitoring of laser metal-wire additive manufacturing temperature field using infrared thermography

Zhu Jinqian<sup>1</sup>, Ling Zemin<sup>1</sup>, Du Farui<sup>1</sup>, Ding Xueping<sup>2,3</sup>, Li Huimin<sup>1</sup>

- (1. School of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
2. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China;
3. Chongqing Key Laboratory of Additive Manufacturing Technology and Systems, Chongqing 400714, China)

**Abstract:** For achieving precisely "controlling shape and performance" of components by additive manufacturing, scientific understanding is needed for thermal process. Taking laser metal-wire additive manufacturing (AM) under vacuum and using single-pass as an example, the thermal process was monitored based on infrared (IR) thermography. The effect of wire feeding speed on temperature field, thermal cycle, cooling rate was analyzed. The width of cladding layer and defect were studied based on IR thermography. The results show that the temperature monitoring was achieved. Along the length of cladding layer, the maximum temperature for monitoring point increased and then the cooling rate decreased. With wire feeding speed increasing, it led to the decrease of cooling rate for monitoring point at 1/4, 2/4, 3/4 of cladding layer. In addition, the width of cladding layer could be predicted and the location of defect could be located with the help of IR thermography analysis.

**Key words:** infrared thermography; additive manufacturing; laser metal-wire; wire feeding speed

收稿日期: 2018-01-12; 修订日期: 2018-02-15

基金项目: 中国科学院重点部署项目(ZDRW-KT-2016-1; KGZD-EW-T04); 重庆市基础科学与前沿技术研究一般项目(cstc2016jcyjA0059); 先进焊接与连接国家重点实验室面上项目(AWJ-M16-03)

作者简介: 朱进前(1992-), 男, 硕士生, 主要从事激光熔丝增材制造方面的研究。Email: zhujinqian@cqu.edu.cn

通讯作者: 丁雪萍(1988-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事激光熔丝增材制造方面的研究。Email: dingxueping@cigit.ac.cn

## 0 引言

增材制造技术采用材料逐层累加的方法制造实体零件,在航空航天、能源动力、国防军工等领域应用广泛<sup>[1-2]</sup>。对于金属增材制造,按照材料形态可分为粉末增材和丝材增材。与粉末增材相比,丝材增材具有成本低,材料利用率和熔敷率高,材料易回收,环境污染少等特点<sup>[3]</sup>。因此,发展金属丝材增材制造技术具有重大意义。

目前,按照使用热源可分为电弧、电子束、激光三种金属丝材增材制造技术。针对电弧熔丝增材,研究者们提出了 GMAW 电弧增材<sup>[4]</sup>、CMT 冷金属过渡增材<sup>[5]</sup>、TIG 脉冲电弧增材<sup>[6]</sup>、等离子体转移弧增材<sup>[7]</sup>。针对电子束熔丝增材,NASA 兰利研究中心提出电子束自由成形技术<sup>[8]</sup>。但电弧和电子束熔丝增材均存在热输入大、熔池和热影响区过大和过热等问题,导致成形件成形精度低、残余应力大。而激光熔丝增材具有热影响区较小、成形精度较高等优势<sup>[9]</sup>,因此发展激光熔丝增材具有极大应用前景。

在增材制造过程中,其热过程较为复杂,前层对后层有预热作用,后层对前层有后热作用,堆积零件热积累严重,直接影响成形件组织、性能,因此为实现对成形件控形控性,亟需对其热过程进行研究分析。随着红外测温技术的发展,促进了增材制造过程中温度场监测研究。但是目前相关研究多是针对激光选区熔化成形<sup>[10-11]</sup>,利用红外测温仪获得被测区域内平均温度大小,无法获得温度场空间分布情况。

因此,文中致力于利用红外热像技术对激光熔丝增材制造热过程的时间、空间分布变化进行监测。考虑到单道成形是增材制造的基础,重点针对真空环境下激光熔丝单道成形热过程进行研究,为其增材制造奠定工艺基础。

## 1 试验过程

在进行激光熔丝增材制造过程中,试验基板为 Ti6Al4V 钛合金,焊丝为 ER5356 铝合金,其中基板尺寸为 150 mm×80 mm×10 mm,焊丝直径为 0.4 mm。

试验系统包括真空系统、激光系统、送丝系统、温度监测系统等,如图 1 所示。其中,真空系统采用机械泵抽真空;激光系统采用 CLM 光纤激光器,波长

1 080 nm,最大输出功率为 200 W,光斑直径为 800 μm;送丝系统采用拉丝式送丝;温度监测系统为 FLIR A655sc 红外热像仪,波长范围为 7.5~14 μm,分辨率为 640×480,帧频为 50 Hz,测温区间为-40~2 000 ℃。为实现红外热像仪准确测温,要求红外热像仪尽可能垂直于熔敷道,此外必须进行发射率标定<sup>[12-13]</sup>。此试验利用热电偶和红外热像仪同时对某处温度进行测量,通过改变发射率使红外热像监测温度同热电偶测得温度保持一致,进而实现发射率标定。

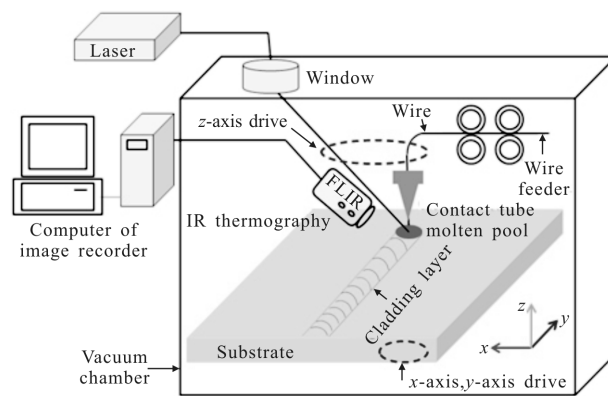


图 1 试验系统图

Fig.1 Schematic of experiment system

## 2 结果与分析

激光熔丝增材制造过程中试验工艺参数见表 1。

表 1 试验参数

Tab.1 Experimental parameters

Wire feeding speed $v_f/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	Scanning speed $v_s/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	Laser power $P/\text{W}$	Defocus amount $d/\text{mm}$	Pressure $p/\text{Pa}$
8.5/15/25/	5	193	-2.5	20

图 2 显示了激光熔丝单道成形过程中温度场分布变化情况。红外热像图中除了熔敷道(矩形框所示),还有两个温度区(椭圆框所示),分别为导嘴和焊丝端部高温区及其阴影区。该阴影区形成原因是导嘴和焊丝在基板表面镜面发射的结果,可通过减小红外热像仪和熔敷道法线方向夹角减小阴影区的影响。

图 3 显示了激光熔丝单道成形结束后冷却过程温度变化情况。观察发现,随着冷却时间的推移,熔敷道表面最高温度呈现降低趋势。冷却时间 0 s(即激

光熔敷刚完成)时,熔敷道表面最高温度为 995.13 °C, 2 s 后降低为 574.57 °C, 5 s 后降低为 239.86 °C, 10 s 后其表面最高温度仅有 179.09 °C。基于红外热像,可实现对激光熔丝过程中温度场的监测,为认识其热过程提供参考。

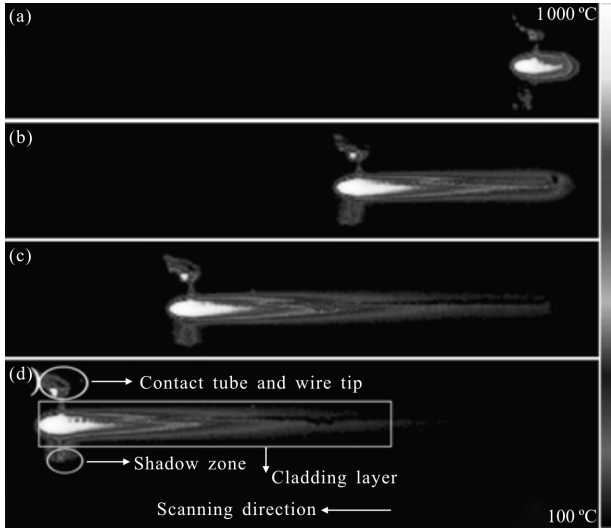


图 2 激光熔丝过程红外热像图

Fig.2 IR thermal image of cladding layer during the process of laser cladding

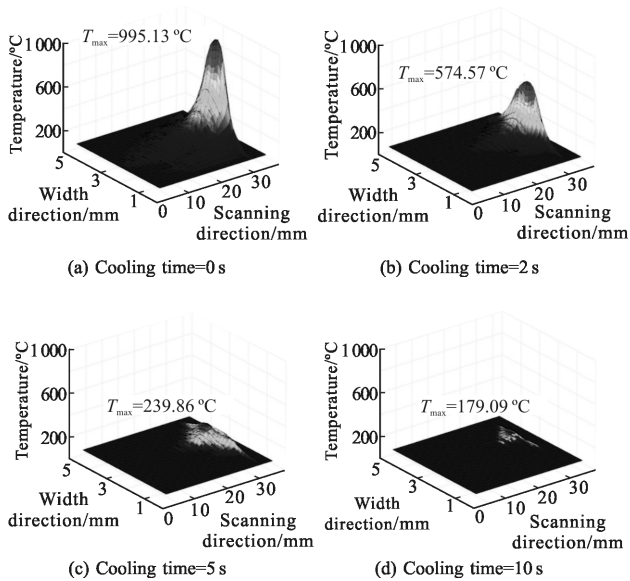


图 3 冷却阶段熔敷道温度场变化

Fig.3 Temperature field for cladding layer during cooling process

以  $V_f=8.5 \text{ mm/s}$  为例,研究激光熔丝过程中热循环变化规律,在熔敷道选取 3 个监测点,其中 1、2、3 点分别位于熔敷道成形长度方向的 1/4、2/4、3/4 位置,且位于熔敷道成形宽度方向的中心位置。监测点

位置及热循环曲线图如图 4 所示。每个监测点均经历了升温 and 降温两个阶段。随着熔敷过程中熔敷道的沉积,散热条件变差,导致远离熔丝开始处监测点对应最高温度  $T_{\max}$  呈现升高趋势 ( $T_{\max1}=678 \text{ °C}$ ,  $T_{\max2}=726 \text{ °C}$ ,  $T_{\max3}=789 \text{ °C}$ )。

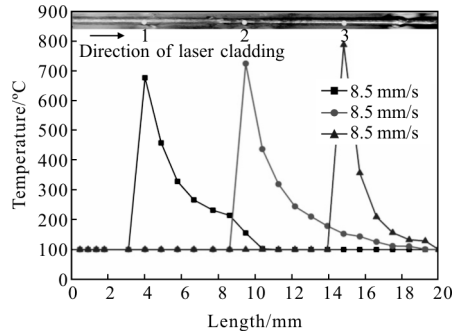
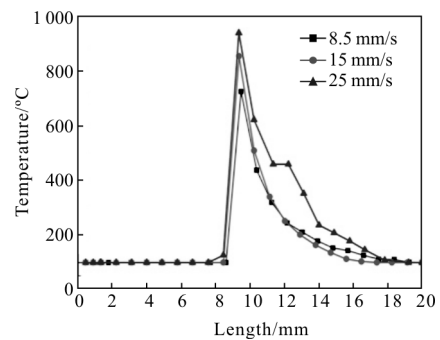


图 4 不同监测点对应热循环曲线

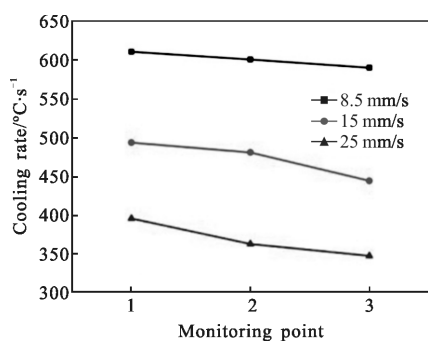
Fig.4 Thermal cycle for different monitoring points

对于送丝速度对热循环、冷却速率、金相组织的影响规律,结果见图 5。图 5(a)为监测点 2 在不同送丝速度下对应的热循环曲线。观察发现:由于扫描速度固定不变,随着送丝速度增大,焊丝熔敷量增多,导致峰值温度随之增大。冷却速率分析结果见图 5(b),观察发现随着激光熔丝过程的进行,远离熔丝开始处的监测点 3 的冷却速率较低,原因为熔丝形成的熔敷道导致散热条件变差。此外随着送丝速度增大,其冷却速率随之减小,这是由于焊丝熔敷量增多,散热条件变差所致。众所周知,较快冷却速率有利于获得细小金相组织。熔敷道金相图结果见图 5(c),从左至右,依次对应送丝速度 8.5、15、25 mm/s,观察发现随送丝速度增加,其晶粒尺寸明显变大,与红外热分析得到的冷却速率规律吻合良好。

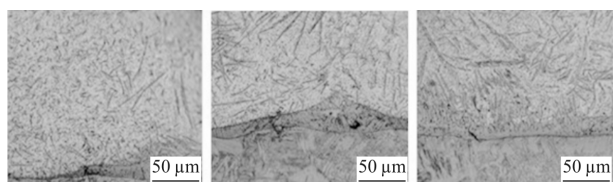


(a) 热循环

(a) Thermal cycle



(b) 冷却速率  
(b) Cooling rate



(c) 金相组织  
(c) Microstructure

图 5 送丝速度对热循环、冷却速率和金相组织的影响

Fig.5 Effect of wire feeding rate on thermal cycle, cooling rate and microstructure

为实现基于红外热像对熔敷道宽度的预测,首先利用差热分析仪测定 5356 铝合金 DSC 曲线,见图 6,获得其熔点为 634.2 °C。根据熔点,可在红外热像图中获取熔敷道宽度信息。为减少误差,对熔敷道多处位置多次测量,求其平均值。试验测量同样如此。图 7 显示了利用红外热像提取的熔敷道宽度与试验测量值吻合良好,证明基于红外热分析可实现对熔敷道宽度的预测。

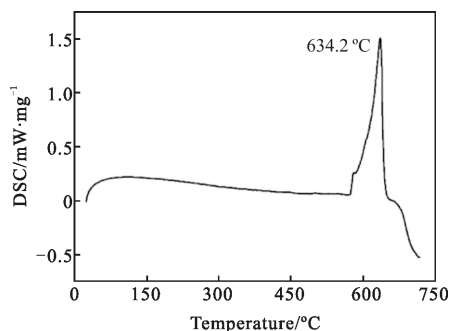


图 6 5356 铝合金 DSC 曲线

Fig.6 DSC curve obtained on the 5356 Al alloy

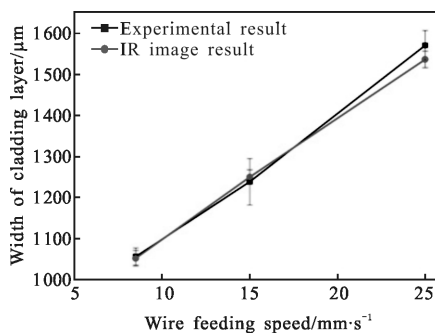


图 7 熔敷道宽度红外测量值与试验值比较

Fig.7 Comparison of cladding layer's width between IR image and experimental result

利用红外热像线分析功能,提取熔敷道中心线最高温度沿其长度方向变化信息,同时与熔敷道表面成形进行对比,结果如图 8 所示。观察发现,当送丝速度为 8.5 mm/s 和 25 mm/s 时,温度曲线波动较小,对其求平均值及标准差,发现送丝速度为 8.5 mm/s 时,平均温度为 705.4 °C,标准差为 10.94 °C;送丝速度为 25 mm/s 时,平均温度为 938.4 °C,标准差为 14.37 °C,两种送丝速度下对应的熔敷道表面成形较好。而送丝速度为 15 mm/s 时,其温度曲线有明显波动,出现了四处温度明显较低的位置,在对应的熔敷道上相同位置,发现出现未熔合缺陷,如图 8 椭圆框所示。四处低温区的出现是由于未熔合缺陷处与无缺陷处的发射率不同造成的。这种未熔合缺陷推测其形成原因为送丝不稳等偶然因素造成。因此,对于材料性质或表面状态发生变化并形成缺陷的位置,可以通过红外热分析对缺陷位置进行定位,实现红外无损检测,为缺陷的靶向消除提供参考。

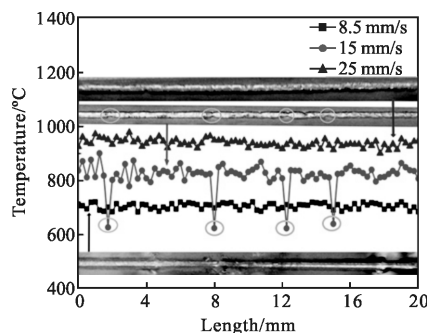


图 8 熔敷道表面成形及温度

Fig.8 Temperature and surface shape of cladding layer

### 3 结论

通过利用红外热像仪可实现对激光熔丝增材制

造单道成形热过程温度场变化的监测, 得到以下结论和展望:

(1) 沿熔敷道成形长度方向, 监测点对应最高温度和冷却速率呈现升高和降低趋势。

(2) 随着送丝速度的增加, 焊丝熔敷量增加, 导致冷却速率随之减小。

(3) 借助红外热分析可实现对熔敷道宽度预测以及缺陷位置的定位。

(4) 未来将对激光熔丝增材单层多道、多层多道成形热过程进行红外监测, 加强对增材制造循环加热和冷却过程的科学认识。

参考文献:

[1] Wang Huaming. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(10): 2690-2698. (in Chinese)  
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.

[2] Wu Weihui, Xiao Dongming, Mao Xing. Automatic design and laser additive manufacturing of supe-light structure of metal part [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1106009. (in Chinese)  
吴伟辉, 肖冬明, 毛星. 金属零件自动超轻结构化设计及激光增材制造 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(11): 1106009.

[3] Ding D H, Pan Z X, Cuiuri D, et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81(1): 465-481.

[4] Xiong Jun. Forming characteristics in multi-layer single-bead GMA additive manufacturing and control for deposition dimension[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)  
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.

[5] Cong Baoqiang, Ding Jialuo, Stewart Williams. Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al -6.3% Cu alloy [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76(9-12): 1593-1606.

[6] Wang F, 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, 44A: 968-977.

[7] Jhavar S, Jain N K, Paul C P. Development of micro-plasma transferred arc ( $\mu$ -pta) wire deposition process for additive layer manufacturing applications [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214: 1102-1110.

[8] Matz J E, Eagar T W. Carbide formation in alloy 718 during electron-beam solid freeform fabrication [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2002, 33: 2559-2567.

[9] Heralic A. Monitoring and control of robotized laser [D]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2012.

[10] Chivel Y. Optical in-process temperature monitoring of selective laser melting [J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 904-910.

[11] Clijsters S, Craeghs T, Buls S, et al. In situ quality control of the selective laser melting process using a high-speed, real-time melt pool monitoring system [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 75: 1089-1101.

[12] Ding X P, Li H M, Zhu J Q, et al. Application of infrared thermography for laser metal-wire additive manufacturing in vacuum [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 81: 166-169.

[13] He Xianzhong, Yuan Qiang, Huang Mingqi, et al. Application of infrared imaging technology in boulder layer transition measurement for metal model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0604004. (in Chinese)  
何显中, 袁强, 黄明其, 等. 红外成像技术在金属模型转捩测量中的应用 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(6): 0604004.