

选区激光熔化金属成型熔池温度的在线检测

袁景光¹, 李宇¹, 刘京南¹, 陈从颜^{1*}, 庞恩林², 谭树杰², 金亚鸣²

¹东南大学自动化学院, 江苏 南京 210096;

²南京前知智能科技有限公司, 江苏 南京 211111

摘要 熔池温度是选区激光熔化金属成型过程的一个重要参数。为了实现熔池温度的闭环控制, 基于比色测温与光电检测技术完成了熔池温度的在线检测。提出了一种复合结构的放大电路, 它可成功检测到幅度小、变化快的熔池辐射信号。搭建嵌入式系统将熔池辐射数据上传至金属成型设备的工控机中, 运用比色测温法解决了辐射光强检测受激光入射角等因素影响的问题, 并求解得到了熔池温度。以 90%Cu-10%Sn 合金粉末作为成型材料进行实验, 利用窄带滤光片测得在 540~660 nm 光谱范围内熔池辐射最强的波段位于 580~590 nm; 在 40~200 W 激光功率下, 测算得到的熔池温度为 700~1700 °C。选区激光熔化金属成型熔池温度的在线检测, 可为金属成型设备的控制系统提供熔池温度反馈, 可作为升级该设备的一种参考。

关键词 激光技术; 选区激光熔化; 熔池温度检测; 比色测温法; 复合放大电路

中图分类号 TN249; TP274

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0302008

Online Detection of Molten Pool Temperature During Metal Forming Based on Selective Laser Melting

Yuan Jingguang¹, Li Yu¹, Liu Jingnan¹, Chen Congyan^{1*},
Pang Enlin², Tan Shujie², Jin Yaming²

¹School of Automation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

²Profeta Intelligent Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211111, China

Abstract The temperature of the molten pool is one of the most important parameters in the process of metal forming based on selective laser melting. To ensure the closed-loop control of molten pool temperature, this study implements an online detection of molten pool temperature based on the colorimetric temperature measurement method and photoelectricity technology. It proposed a type of composite operational amplifier that successfully detected the molten pool radiation signal with small amplitude and fast change. An embedded system was built to upload the radiation data of the molten pool to the industrial computer of metal forming equipment. A method of colorimetric temperature measurement was employed to eliminate the effects of the laser incident angle and other agents on the detection of radiation intensity, and furthermore, to obtain the temperature of the molten pool. During the process of melting 90%Cu-10%Sn alloy powder, it is found that the band with the strongest radiation in the molten pool of the material is 580–590 nm within the spectral range of 540–660 nm. Under the laser power range of 40–200 W, the estimated molten pool temperature range is 700–1700 °C. The online detection of molten pool temperature during metal forming based on selective laser melting provides feedback information of molten pool temperature for the control system of metal forming equipment. Furthermore, the proposed approach of online detection also can be considered as a reference to upgrade the equipment.

Key words laser technique; selective laser melting; temperature detection of molten pool; colorimetric temperature measurement method; composite operational amplifier

OCIS codes 350.3390; 350.3850; 350.5610; 120.6780

收稿日期: 2019-07-30; 修回日期: 2019-09-27; 录用日期: 2019-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(U1531104)

* E-mail: chency@seu.edu.cn

1 引 言

金属增材制造技术,亦称为金属三维打印技术,是当前先进制造技术中最前沿和最具潜力的技术之一,已被广泛应用于航空航天、生物医疗等领域^[1]。选区激光熔化(SLM)技术是多数金属增材设备采用的成型技术,该技术利用高能激光束扫描粉末状材料,使材料快速熔化后再快速冷却凝固,并以此过程层层堆砌成型^[2]。目前,SLM金属成型设备正处于快速发展的阶段,但成型后的产品仍可能出现裂纹、孔隙等质量问题^[3-5]。SLM金属成型的产品质量与加工材料的热过程息息相关^[6-8],扫描激光的入射角度、熔池在成型产品结构中的几何方位、材料的热传导差异等都可能引起熔池温度不稳定,从而引起熔池的熔融程度不一样,成型的产品由于应力而变形,降低产品的力学性能^[9-11]。因此,有必要在线检测成型过程中熔池的温度,为SLM金属成型闭环控制系统的实现反馈熔池温度信息,从而提高成型工艺水平与成型产品的质量。

目前,国内外已在金属焊接及激光熔覆领域对熔池温度的检测进行了研究:曹宏岩等^[12]利用红外热成像技术对金属焊接过程中熔池的温度场进行了检测,实现了对金属焊接质量的在线检测;袁钰函等^[13]利用彩色 CCD 配合红外测温仪搭建了一套应用于激光熔覆的高精度熔池温度场检测系统。采用类似红外热成像技术或 CCD 图像分析技术难以实现熔池温度的实时在线检测。相比于金属焊接和激光熔覆,SLM金属成型熔池形成的时间更短,通常在 μs 级^[14-15]。杜道中等^[16]利用光电管检测了SLM陶瓷成型过程中熔池的红外光强,并将光强与

红外热成像测温数据进行标定,实现了SLM陶瓷成型熔池温度的检测。SLM金属成型过程中熔池形成的时间远小于陶瓷材料,且光强检测结果受激光入射角的影响明显。目前针对SLM金属成型熔池温度在线检测的研究成果还比较少,其主要困难在于熔池辐射本身属于微弱信号,且变化速率快,要求信号检测电路具有宽带高速、低失调、低漂移,以及较强的抗干扰能力等特点。

本文使用光电二极管作为传感器检测SLM金属成型过程中熔池的辐射强度,并基于复合放大电路实现了宽带高速、低失调、低漂移、抗干扰能力强的光电检测。此外,本文运用比色测温原理规避了激光入射角等因素影响光强检测结果的问题,建立了高速数据处理系统,完成了熔池温度的在线检测,为SLM金属成型闭环控制系统的实现提供了可行的技术方案。本文以90%Cu-10%Sn合金粉末作为成型材料,利用窄带滤光片测定了熔池的辐射光谱特性,并运用比色测温法测算了不同激光功率下的熔池温度,实现了熔池温度的在线检测。

2 熔池温度在线检测的系统结构

针对SLM金属成型设备,搭建熔池温度在线检测系统,其整体结构如图1所示。

图1中,入射激光经振镜系统会聚后扫描加工台上的金属粉末材料,熔池在光斑处快速形成,并在光斑移动后快速冷却凝固。因光路可逆,故熔池辐射及部分被材料反射的激光经振镜系统传输至同轴分光镜,分光镜分离激光后输出的熔池辐射主要来自光斑处的熔池,少量来自非光斑处的熔池。窄带滤光片组筛选出熔池在两个窄带波段的辐射,并被

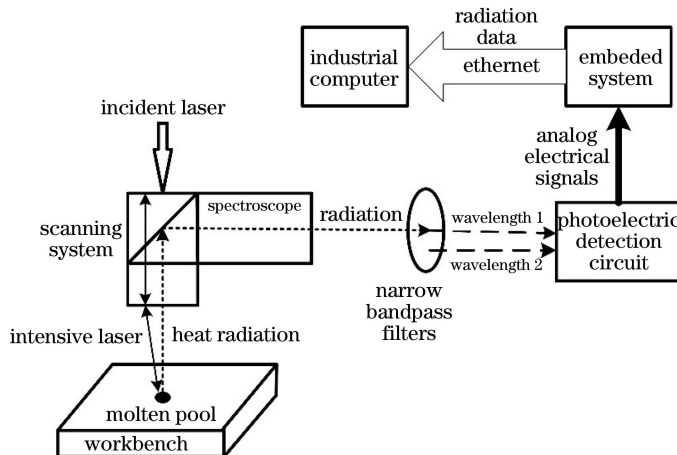


图1 熔池温度在线检测系统的结构框图

Fig. 1 Structure diagram of molten pool temperature online detection system

光电检测电路分别感应。基于 STM32F7 单片机的嵌入式系统将光电信号转换为熔池辐射数据,并由工业以太网将其上传至 SLM 金属成型设备的工控机。工控机将两个窄带波段的熔池辐射强度作比值处理。采用比色测温法计算熔池的温度。

光电检测电路接收到的光线,实际上来自加工台上熔池所在的某一曲面,其面积会受振镜系统光圈的影响,本文称此曲面为观测曲面。光斑处的熔池温度最高,辐射最强,非光斑处的相邻熔池处于快速冷却或正在形成的状态,温度较低,辐射较弱。光电管按一定周期检测到的辐射峰值来自当前状态下温度最高的熔池,本文视检测到的熔池辐射在观测曲面内均匀分布,则系统计算获得的温度为此熔池在观测曲面内的宏观平均温度。本文提及的熔池温度,若无特别说明,皆表示某一时刻,熔池在固定面积的观测曲面内的平均温度。

3 理论依据

3.1 比色测温法的应用

根据普朗克黑体辐射定律,温度为 T 、发射率为 $\epsilon(\lambda, T)$ 的物体在波长 λ 处的辐射出射度可表示为

$$M(\lambda, T) = \frac{\epsilon(\lambda, T)C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}, \quad (1)$$

式中: λ 为波长; C_1 为第一辐射常数; C_2 为第二辐射常数。在实际测温中,常使用韦恩位移定律作近似计算:

$$M(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T)C_1\lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right). \quad (2)$$

在一定温度区间内,材料在两个相近波长下的发射率近似相等。在同一温度下取两个相近波长下的辐射出射度作比值计算,可得比色测温法^[17] 的温度求解公式,即

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{5 \ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) + \ln \left(\frac{M_1}{M_2} \right)}, \quad (3)$$

式中: M_1 与 M_2 分别为温度 T 时材料在波长 λ_1 和 λ_2 下的辐射出射度。不同波长下的辐射出射度,实际上表现为材料在不同窄带波段的辐射光强,可选用中心波长在熔池辐射光谱峰值波长附近的两个窄带滤光片,分别检测熔池在两个窄带波段的辐射。工程上可将某窄带波段的辐射视为该波段中心波长的辐射,并以此计算熔池温度。

光电检测电路的输出电压 V 与材料的辐射出射度 M 之间的工程折算关系可表示为

$$V = \alpha \cdot \eta \cdot P' + \Delta = \eta \cdot \alpha \cdot \beta \cdot M \cdot S + \Delta, \quad (4)$$

式中: S 为感光面积; P' 为光电管接收到的光功率; η 为光电管的感光系数; α 为检测电路的缩放系数; β 为光学系统的传导系数; Δ 为检测电路的输出偏移。因此(3)式可改写为

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{5 \ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) + \ln \left(\zeta \cdot \frac{V_1 - \Delta_1}{V_2 - \Delta_2} \right)}, \quad (5)$$

式中: ζ 为数值折算系数。根据熔池温度在线检测系统的各项参数选取合适的 ζ 值,可提高计算的准确度。比色测温法可避免材料发射率的测定。本文的 SLM 熔池温度在线检测系统使用了同轴分光镜,激光入射角即为观测熔池的角度。若直接使用熔池在某个波长下的辐射强度表示熔池温度,则难以确定辐射强度检测结果的变化是由激光入射角引起的,还是由熔池温度引起的。因此,比色测温法将熔池在两个波长下的辐射强度作比值处理,可抵消激光入射角对熔池辐射强度检测结果的影响,提升熔池温度检测的可靠性

3.2 SLM 熔池温度场模型

SLM 成型过程中对粉末材料作用的激光可视为高斯热源^[18],用方程表示为

$$q_1 = \frac{2\epsilon_q \cdot P}{\pi\omega^2} \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right), \quad (6)$$

式中: q_1 为激光给予材料的能量; P 为激光功率; ω 为激光光斑的半径; r 为材料表面任意一点到激光光斑中心的距离; ϵ_q 为材料的等效发射率,也可表示辐射吸收率。熔池形成的过程可视为三维瞬态热传导过程^[19],其方程为

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q, \quad (7)$$

式中: ρ 为材料密度; c 为材料的比热容; k 为材料的热传导系数; t 为激光作用于粉末材料的时间; Q 为单位体积的热功耗; x, y, z 为空间坐标值。熔池的辐射方程为

$$q_r = k \cdot \Delta T = \epsilon_q \cdot \sigma_b (T^4 - T_a^4), \quad (8)$$

式中: q_r 为辐射溢出能量; σ_b 为斯特藩-玻尔兹曼常数; T_a 为环境温度。熔池与周围气体的对流换热方程为

$$q_c = h_c (T - T_a), \quad (9)$$

式中： q_c 为气体的对流热量； h_c 为自然对流系数。

基于能量守恒的原理联立方程组，可获得熔池的温度场分布。假设 SLM 成型过程中激光光斑直径为 $50\ \mu\text{m}$ ，材料体积无穷大，且致密度较高。利用 ANSYS 软件初步建立 90%Cu-10%Sn 合金粉末单个熔池的温度场模型，并将有限元仿真数据记录于表 1 中。

表 1 90%Cu-10%Sn 合金粉末熔池温度场的仿真数据
Table 1 Simulated data of 90%Cu-10%Sn powder molten pool temperature field

Laser power P_{lc}/W	Central temperature of molten pool $T_c/^\circ\text{C}$	Diameter of molten pool $D_c/\mu\text{m}$	Time of shaping $t_c/\mu\text{s}$
40	673	0	0
80	1208	24	60
120	1725	42	62
160	2246	58	83

表 1 数据有熔池尺寸为 0 的记录，这是由于 90%Cu-10%Sn 合金粉末的熔点约为 $970\ ^\circ\text{C}$ ^[20]，通过仿真计算获得的温度未达材料的熔点，熔池并未形成。从表 1 中可以看出，随着激光功率增大，熔池的中心温度升高，熔池尺寸增大，单个熔池形成的时间亦有所延长。理论上，熔池中心温度升高及熔池尺寸增大，也将导致熔池在固定面积的观测曲面内的宏观平均温度升高。因此，依据本文技术方案检

测到的熔池温度亦将随激光功率的增大而升高。熔池温度作为参考数据可在一定程度上反映实际熔池的中心温度、尺寸乃至温度场分布，进一步可推测 SLM 金属成型工艺的质量水平。

4 光电检测电路的设计

为了应对 SLM 金属成型过程中熔池形成的时间在 μs 级的情况，选用感应灵敏、线性度高且响应速度快的 PIN 型光电二极管^[21]作为传感器。若要检测金属材料在特定波段的热辐射，需要采用特制的光电感应器件，该类器件目前在国际市场被严格控制，难以批量采购。因此，本文仅讨论通用光电管的电路方案。由于光学系统在传输熔池辐射过程中会衰减光强信号，光电二极管实际感应输出的光电流信号在 μA 级以下，因此要求光电检测电路具备宽带高速、低失调、低漂移以及抗干扰能力强等特性。检测微弱电流信号需使用低漂移、低失调、低偏置的精密运算放大器(以下简称“运放”)^[22]，此类运放的带宽较低；而高速运放的失调、偏置和漂移较大。因此，使用常见的通用运放电路难以满足光电检测的性能要求。本文设计了具有复合结构的专用放大电路^[23-25]以折中两种运放的性能，使电路既能检测微弱信号，又可快速响应。设计光电检测前置电路的原理图如图 2 所示。

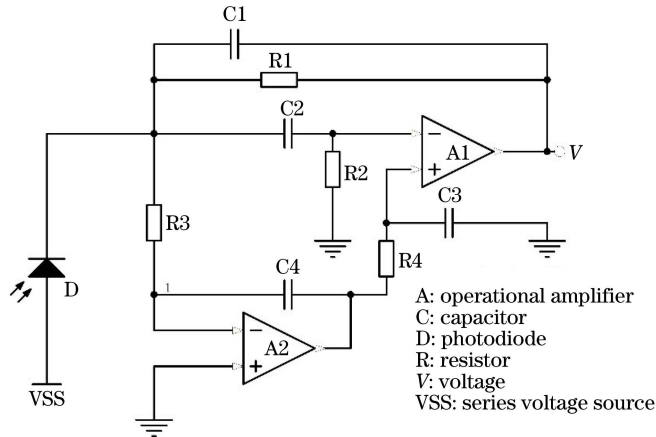


图 2 光电检测前置电路原理图

Fig. 2 Schematic of photoelectric detection prepositional circuit

图 2 中：A2 是精密运放；A1 是高速运放；运放 A2 与电阻 R3、电容 C4 构成积分电路，保持输入信号的直流分量，同时补偿运放 A1 的输入失调，使电路可识别微弱的输入信号；输入信号的高频分量通过电容 C2 耦合至运放 A1，并由宽频带的运放 A1 输出。因此，图 2 所示电路可及时响应变化快速的

输入信号。复合放大电路在频域上引入两个运放的开环极点，调整 R2、R4 的电阻值及 C1、C3 的电容值可配置电路的零极点分布，使电路稳定运行。

在光电检测前置电路中，选用 S1223 光电二极管、OPA377 精密运放和 OPA356 高速运放。运放的复合连接改善了电路在高增益下的动态性能，

实现了对微弱信号的高倍放大,以及对信号跳变的快速响应。光电检测使用复合放大电路技术,解决了SLM金属成型过程中由熔池形成时间短、辐射

信号微弱且变化迅速而导致的及时检测熔池辐射困难的问题。光电检测电路的印刷电路板(PCB)实物图如图3所示。

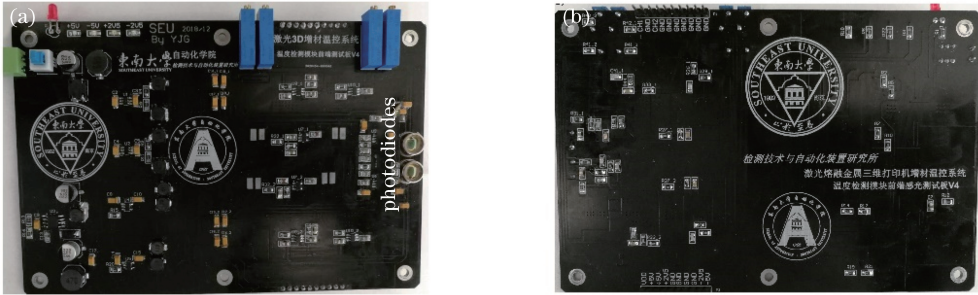


图3 光电检测 PCB 实物图。(a)正面;(b)反面

Fig. 3 Pictures of photoelectricity PCB. (a) Front; (b) back

5 实验结果与分析

对光电检测电路的动态性能进行测试,并调试熔池温度在线检测系统,记录相关数据。选用南京

前知智能科技有限公司自行研发的 Tr150 型 SLM 金属成型设备作为实验工程机。实验平台实物图如图4所示,其中,图4(a)为设备整机,图4(b)为在线检测系统。

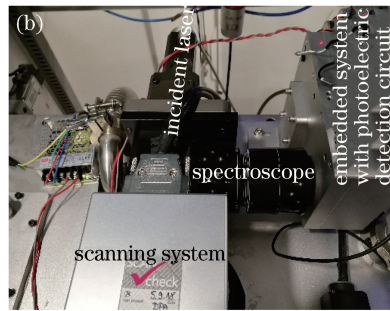
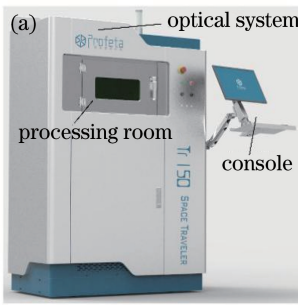


图4 实验平台实物图。(a) SLM 金属成型设备整机;(b) 安装的熔池温度在线检测系统

Fig. 4 Pictures of experimental platform. (a) SLM metal forming equipment;

(b) installed online detection system of molten pool temperature

在实际调试过程中,SLM金属成型设备的加工室内充入氮气,控制氧气的体积分数低于0.2%。调节振镜系统的光圈,设置观测曲面约为 10 mm^2 。选用90%Cu-10%Sn合金粉末作为SLM成型材料,粉末颗粒直径约为 $45\text{ }\mu\text{m}$,每层合金粉末的厚度为 $60\text{ }\mu\text{m}$ 。激光波长为 1024 nm ,激光在加工台上会聚的光斑直径为 $50\text{ }\mu\text{m}$;激光扫描速度设置为 650 mm/s ,激光功率可在 $40\sim 200\text{ W}$ 内根据实验需求设置。窄带滤光片的中心波长通透率为50%,光通带宽为 10 nm 。

5.1 光电检测电路响应速率的测试

使用周期为 $20\text{ }\mu\text{s}$ 、高电平占脉冲周期50%的方波作为输入信号,测试光电检测电路的响应速率。将方波输入信号与电路的响应波形绘制在同一坐标系中,如图5所示。

图5中,虚线为输入的方波信号,实线为电路的

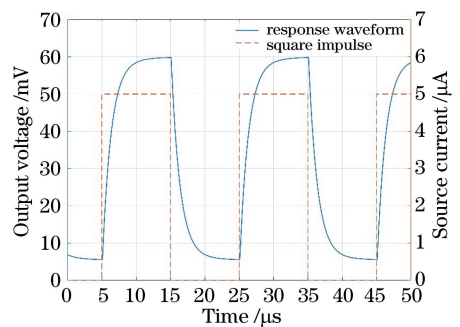


图5 光电检测电路的方波响应波形图

Fig. 5 Square impulse response oscillogram of photoelectric detection circuit

响应波形。该图表明,光电检测电路对方波输入的响应上升时间约为 $5\text{ }\mu\text{s}$,满足SLM金属成型熔池温度在线检测的动态响应要求。这说明本文提出的基于复合结构放大电路的光电检测前置电路是合理可行的。

5.2 熔池辐射在激光非连续扫描下的动态响应

设置激光功率为 180 W, 选用中心波长为 550 nm 的窄带滤光片, 以 4 μ s 为一个周期拾取光电检测信号, 记录激光非连续扫描时熔池辐射的变化过程。在激光非连续扫描过程中, 光电检测电路的输出电压幅值随时间的响应曲线如图 6 所示。

图 6 中, 虚线表示光电检测电路在激光扫描结束时的响应, 实线为光电检测电路在激光扫描开始时的响应曲线。由该图可知, 在本文实验所设置的 SLM 工艺条件下, 90%Cu-10%Sn 合金粉末熔池的升温与冷却时间为 100~200 μ s, 与激光扫描的功率及速度相匹配, 同时与上文仿真计算的结果相近。

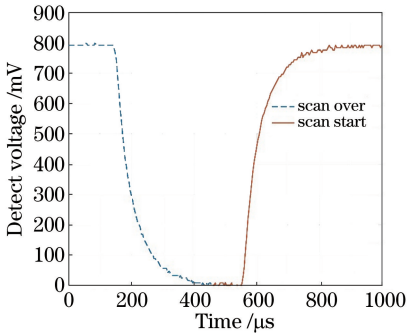


图 6 激光非连续扫描时光电感应幅值随时间的响应曲线
Fig. 6 Response curve of photoelectric induction amplitude with time at discontinuous scanning of laser

5.3 熔池光谱特性的获取

将激光功率设置为 100 W, 在激光连续扫描过程中以 40 μ s 为一个周期随机拾取检测信号, 记录不同中心波长的窄带滤光片下, 光电检测电路可感应到的熔池辐射强度。以光电管感应到的光功率表示熔池辐射强度, 实验数据如表 2 所示。

表 2 100 W 激光功率下 90%Cu-10%Sn 合金粉末熔池辐射的检测结果

Table 2 Radiation detection result of 90%Cu-10%Sn powder molten pool at laser power of 100 W

Wavelength λ /nm	Reaction power P_R /nW
540	462
550	1428
560	324
570	315
580	35124
590	42685
600	1076
610	237
620	321
630	157
640	1004
650	308
660	178

表 2 表明, 在 540~660 nm 波段范围内, 90%Cu-10%Sn 合金粉末熔池在 580~590 nm 波段的辐射强度远大于其他波段。

5.4 不同激光功率下熔池温度的检测

从 40 W 到 200 W 间隔 20 W 递增设置激光功率, 用每个功率下的激光连续扫描 90%Cu-10%Sn 合金粉末 20 ms, 检测熔池在 580 nm 和 590 nm 波长下的辐射强度。扫描过程中以 100 μ s 为一个周期随机拾取检测信号, 分别记录各功率下光电检测电路输出的幅值。计算熔池观测曲面的平均辐射温度, 并将其视为熔池温度。实验数据记录于表 3 中。

表 3 不同激光功率下测得的感应电压信号以及熔池温度

Table 3 Measured voltage signal and molten pool temperature at different laser power

Laser power /W	Voltage at 580 nm /mV	Voltage at 590 nm /mV	Temperature of molten pool / $^{\circ}$ C
40	114	164	983
60	186	284	1054
80	247	387	1141
100	316	498	1226
120	377	597	1310
140	452	709	1390
160	522	812	1473
180	603	942	1570
200	656	1025	1653

表 3 显示, 随着激光功率增大, 熔池温度亦会升高。激光功率、扫描速度以及会聚光斑尺寸本身具有的波动性, 激光入射角以及熔池的空间位置在实验中难以保持恒定, 因此, 表 3 中的实测数据具有瞬态偶然性。通过多次实验和多次抓取检测数据, 可以获得光电检测电路输出信号在各激光功率下的波动区间, 同时可以计算得到熔池温度的波动区间。熔池热辐射及温度与扫描激光功率之间的映射关系如图 7 所示。

图 7 显示: 当激光扫描速度一定时, 90%Cu-10%Sn 合金材料的熔池温度与激光功率正相关; 在相同的激光功率下, 熔池温度存在一定的变化范围, 此范围随激光功率的递增有递减并趋于稳定的趋势。在低激光功率下, 熔池尺寸更小, 材料的热传导存在更多的不稳定因素; 此外, 微弱的噪声信号在检测电路输出信号幅值较小时, 对后续计算的影响更为明显。因此, 在低激光功率下检测到的熔池温度的误差范围较大。在仿真时未考虑实际 90%Cu-10%Sn 合金粉末材料吸收率、热导率等参数的非理

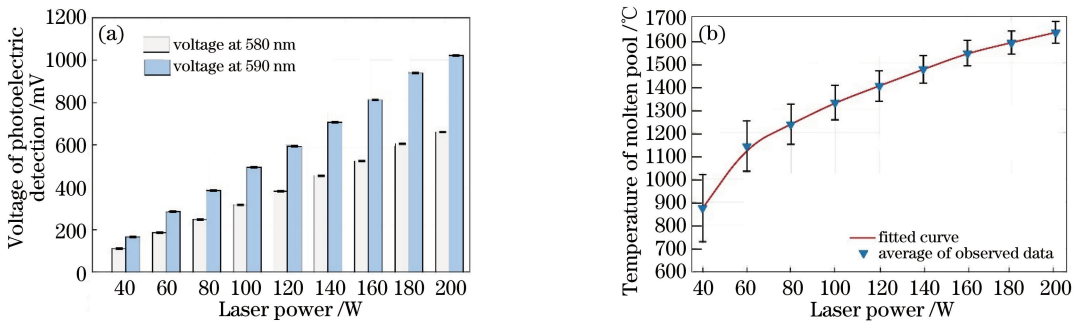


图 7 不同激光功率下 90%Cu-10%Sn 合金粉末熔池温度检测实验结果。

(a)光电检测幅值与激光功率柱状图;(b)熔池温度与激光功率曲线图

Fig. 7 Detection results of 90%Cu-10%Sn powder molten pool temperature at different laser power.

(a) Bar of photoelectric voltage with laser power; (b) graph of molten pool temperature with laser power

想性,导致实验数据与仿真数据存在一定差异。在数据的数量级以及变化趋势上,实验数据与仿真数据比较符合。因此,检测系统有效反映了熔池的温度信息。实验结果亦表明,在 SLM 金属成型过程中,熔池温度并不是稳恒不变的。

6 结 论

针对 SLM 金属成型设备,本文实现了熔池温度的在线检测。利用 PIN 型光电二极管感应熔池辐射并搭建复合放大电路检测光电流,有效检测了幅度小、变化快的熔池辐射信号;配合窄带滤光片组分别检测熔池在两个相近波长下的辐射强度,引入比色测温法来消除激光入射角等因素对温度测算结果的影响;利用基于 STM32 单片机的嵌入式系统采集熔池辐射数据并通过以太网将其上传至 SLM 金属成型设备的工控机中;借助工控机处理数据获取熔池温度,实现熔池温度的在线检测。

本文成功获得了 90%Cu-10%Sn 合金粉末材料在 SLM 成型过程中熔池在 540~660 nm 波段的辐射光谱信息,并得出该合金粉末熔池在该波长范围内辐射最强的波段为 580~590 nm。利用比色测温法计算熔池温度,获得了 90%Cu-10%Sn 合金粉末材料在 40~200 W 激光功率下的熔池温度,其值在 700~1700 °C 范围内,说明本文的熔池温度在线检测方案可为 SLM 金属成型闭环控制系统提供有效的熔池温度反馈信息。

SLM 金属成型熔池温度的在线检测为熔池温度的闭环控制提供了重要的反馈信息。熔池温度的在线检测可用于优化 SLM 金属成型设备的控制系统,提高其工艺水平以及成型产品的质量。关注 SLM 成型过程中熔池的温度可能会成为一种趋势,本文的研究成果可为 SLM 金属增材制造技术的升

级提供有价值的参考。

参 考 文 献

- [1] Zhou C Y, Luo L, Liu Y, et al. Research status of additive manufacturing technology for metal[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(6): 9-14.
周宸宇, 罗岚, 刘勇, 等. 金属增材制造技术的研究现状[J]. 热加工工艺, 2018, 47(6): 9-14.
- [2] Zhou Y H, Zhang Z H, Wang Y P, et al. Selective laser melting of typical metallic materials: an effective process prediction model developed by energy absorption and consumption analysis [J]. Additive Manufacturing, 2019, 25: 204-217.
- [3] Yao Y S, Wang J, Chen Q B, et al. Research status of defects and defect treatment technology for laser additive manufactured products [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 100004.
姚燕生, 汪俊, 陈庆波, 等. 激光增材制造产品缺陷及其处理技术研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 100004.
- [4] Jiang H Z, Li Z Y, Feng T, et al. Factor analysis of selective laser melting process parameters with normalised quantities and Taguchi method[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 119: 105592.
- [5] Xu J G, Chen Y, Chen H, et al. Influence of process parameters on forming defects of H13 steel processed by selective laser melting [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4): 041405.
徐锦岗, 陈勇, 陈辉, 等. 工艺参数对 H13 钢激光选区熔化成形缺陷的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 041405.
- [6] Zhang D Y, Zhang P D, Liu Z, et al. Thermofluid field of molten pool and its effects during selective laser melting (SLM) of Inconel 718 alloy [J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 567-578.
- [7] Kundakcioglu E, Lazoglu I, Poyraz Ö, et al.

- Thermal and molten pool model in selective laser melting process of Inconel 625[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95: 3977-3984.
- [8] Wang H F, Tian X J, Cheng X, et al. Effects of thermal deformation conditions on microstructures and deformation behaviors of laser additive manufactured TC18 titanium alloys [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0302008.
王宏芳, 田象军, 程序, 等. 热变形条件对激光增材制造 TC18 钛合金组织及变形行为的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0302008.
- [9] Sun B B, Fang L J, Zhang X J. Study on forming process and microstructure of GH4169 Ni-based superalloy prepared by selective laser melting [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(12): 93-98.
孙兵兵, 房立家, 张学军. 激光选区熔化镍基高温合金 GH4169 的成形工艺与显微组织研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(12): 93-98.
- [10] Liu W, Liu T T, Liao W H, et al. Study on selective laser melting forming process of cobalt chromium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(5): 0503001.
刘威, 刘婷婷, 廖文和, 等. 选择性激光熔融钴铬合金成形工艺研究[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0503001.
- [11] Zhang X Y, Li X B, Tan Z, et al. Microstructure and mechanical properties of water atomized Cu-10Sn alloy powder formed parts by selective laser melting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 1002009.
张晓雅, 李现兵, 谈震, 等. 激光选区熔化水雾化 Cu-10Sn 合金粉末成形件的微观组织结构及力学性能研究[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1002009.
- [12] Cao H Y, Chen X Z, Hu C, et al. Welding quality online detection based on infrared temperature measurement [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2016, 50(S1): 66-70.
曹宏岩, 陈希章, 胡超, 等. 基于红外温度场的焊接质量在线检测方法[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(S1): 66-70.
- [13] Yuan Y H, Yang Q, Yan Z H, et al. Research and measurement of surface temperature field in laser cladding forming molten pool[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(8): 985-992.
袁钰函, 杨启, 闫昭华, 等. 激光熔覆成形中熔池表面温度场的检测与研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(8): 985-992.
- [14] Mazzoleni L, Demir A G, Caprio L, et al. Real-time observation of melt pool in selective laser melting: spatial, temporal and wavelength resolution criteria [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019: 1.
- [15] Liu T T, Liao W H, Zhang K, et al. Selective laser melting forming hardness rule of cobalt chromium alloy and its prediction model[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0303007.
刘婷婷, 廖文和, 张凯, 等. SLM 成形钴铬合金试件硬度变化规律及其预测模型[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0303007.
- [16] Du D Z, Liu T T, Liao W H, et al. Design of monitoring system of melt pool light intensity in selective laser melting [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(12): 1206002.
杜道中, 刘婷婷, 廖文和, 等. 激光选区熔化熔池光强监测系统的设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(12): 1206002.
- [17] Shao L C. Study of an improved two-colour method integrated with the emissivity ratio model and its application to air-and oxy-fuel flames [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
邵力成. 引入辐射率比值模型的双色测温法研究及其在火焰测温中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [18] Dai D H. Cu-based composites fabricated by selective laser melting: simulation and experiments [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
戴冬华. Cu 基复合材料选区激光熔化数值模拟及实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [19] Ye W J. Numerical simulation on temperature field and morphology evolution of molten pool during selective laser melting processing [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
叶唯娟. 激光选区熔化过程中熔池温度场及形貌演化的数值模拟[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [20] Li C C. Microheterogeneity and structure evolution of Cu-Sn alloy melts [D]. Jinan: University of Jinan, 2013.
李灿灿. Cu-Sn 合金熔体的微观不均匀性及其结构演化[D]. 济南: 济南大学, 2013.
- [21] Menon P S, Tasirin S K, Ahmad I, et al. High performance of a SOI-based lateral PIN photodiode using SiGe/Si multilayer quantum well [C] // 2012 10th IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE), September 19-21, 2012, Kuala Lumpur, Malaysia. New York: IEEE, 2012: 403-406.
- [22] Wang W, Cui M, Li M W, et al. Design of pA level current signal detection circuit[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2019, 40(2): 173-179.
王威, 崔敏, 李孟委, 等. pA 级电流信号检测电路

- 设计[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2019, 40(2): 173-179.
- [23] Sai Kumar K, Lokesh Krishna K, Sidda Reddy P R, et al. Implementation of a CMOS operational amplifier using composite cascode stages[C] // 2019 5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS), March 15-16, 2019, Coimbatore, India. New York: IEEE, 2019: 689-693.
- [24] Groner S, Polak M. Low-distortion, low-noise composite operational amplifier[J]. Journal of the Audio Engineering Society, 2017, 65(5): 402-407.
- [25] Gift S J G, Maundy B. Versatile composite amplifier configuration [J]. International Journal of Electronics, 2015, 102(6): 993-1006.