

# 金属熔体沉积实验装置研究

李素丽<sup>1,2</sup>, 杨来侠<sup>1</sup>, 王 莉<sup>2</sup>, 卢秉恒<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学, 陕西 西安 710054)

(2. 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘 要:** 金属熔体沉积成形涉及金属熔体的产生, 形态演变, 流动, 凝固等热物理过程。根据金属液流断续特性要求, 设计开发了金属熔体沉积装置。结果表明: 通过此实验装置研究实现了金属熔体沉积过程关键参数(脉冲压力、扫描速度、熔体温度、基板温度等)的监测与控制, 为后续深入研究熔体沉积成形技术提供了必要的实验软硬件基础。

**关键词:** 金属熔体; 实验装置; 脉冲压力; 脉冲频率。

中图分类号: TH89

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)06-2154-07

金属熔体沉积 3D 打印技术是 20 世纪 90 年代初兴起的一种新型金属零件快速成型技术, 该技术基于离散/堆积原理, 通过控制金属熔体沉积轨迹, 进行逐点、逐层沉积, 直至成形出复杂零件<sup>[1]</sup>。

欧美对金属 3D 打印技术的研究相对较早, 且近几年涌现出多家 3D 打印公司并陆续推出了商品化的设备<sup>[2]</sup>。而中国主要偏重机理性研究, 其中选择性激光熔融(selective laser melting, SLM)技术<sup>[3]</sup>研究以华南理工大学为主, 电子束成形(electron beam manufacturing, EBM)技术<sup>[4]</sup>主要研究单位是清华大学, 选区激光烧结(selected laser sintering, SLS)技术<sup>[5]</sup>研究主要是南京航空航天大学和华南理工大学。研究激光熔敷沉积(laser cladding deposition, LCD)技术<sup>[6]</sup>主要有西北工业大学。中北大学则自主研发生产了 HLP-350I 激光烧结快速成形机<sup>[7]</sup>。

金属熔体沉积成形涉及金属熔体的产生, 形态演变, 流动, 凝固等热物理过程。根据金属液流断续特性要求, 设计开发了金属熔体沉积装置。本文主要描述金属熔体沉积实验平台及软件控制系统的研制过程, 实现了金属熔体液流沉积过程关键参数(脉冲压力、熔体温度、基板温度等)的控制与监测。

## 1 金属熔体沉积实验装置整体方案设计

金属熔体沉积成形过程受脉冲气压、脉冲频率等多个参数的共同作用, 实验系统需具备以下功能:

1) 利用感应加热使坩埚内的金属材料熔化。成形

原料为固态金属材料, 该系统需将其熔化为熔融材料才能将其用于成形金属件;

2) 利用手套箱净化成形腔内的水氧含量, 以防止熔融金属在沉积成形过程中被氧化;

3) 脉冲气压使熔融金属液流断续为均匀熔体。利用脉冲气压驱动系统, 使熔融金属能通过微小喷嘴形成均匀熔体;

4) 利用金属熔体 3D 打印增材制造成形控制系统, 在 3D 位移平台上成形出所需形状。

本文在分析金属液流断续沉积特性的基础上<sup>[8,9]</sup>, 对金属熔体沉积的实验装置进行了研制(如图 1 所示), 主要包括(1)金属熔炼装置;(2)气体保护装置;(3)3D 位移平台装置;(4)脉冲气体系统;(5)总体控制系统。其中金属熔体成形实验硬件系统包括金属熔炼装置、气体保护装置以及 3D 位移平台; 金属熔体成形实验控制系统包括脉冲控制系统以及金属熔体脉冲压力、温度、三维运动平台的总体控制软件系统及相应的传感及执行器件。

综合以上各装置, 开发的金属液流断续沉积成形实验系统实物图如图 2 所示。金属材料通过熔炼装置熔化后, 由喷嘴喷出, 在脉冲压力作用下形成均匀熔体, 沉积在 3D 位移平台上。为防止氧化, 整个沉积过程全部置于充满氩气的手套箱密封环境中, 通过手套箱侧面的航空插头将各路控制信号输入相对应的子系统实现控制。

收稿日期: 2019-06-15

基金项目: 中央军委装备发展部科研订购局 2017 年准备预研基金(6140923030903); 西安科技大学优秀青年科技基金(2018YQ3-06); 西安科技大学博士启动基金(2017QDJ038)

作者简介: 李素丽, 女, 1981 年生, 博士, 副教授, 西安科技大学机械工程学院, 陕西 西安 710054, 电话: 029-85583114, E-mail: 563456137@qq.com

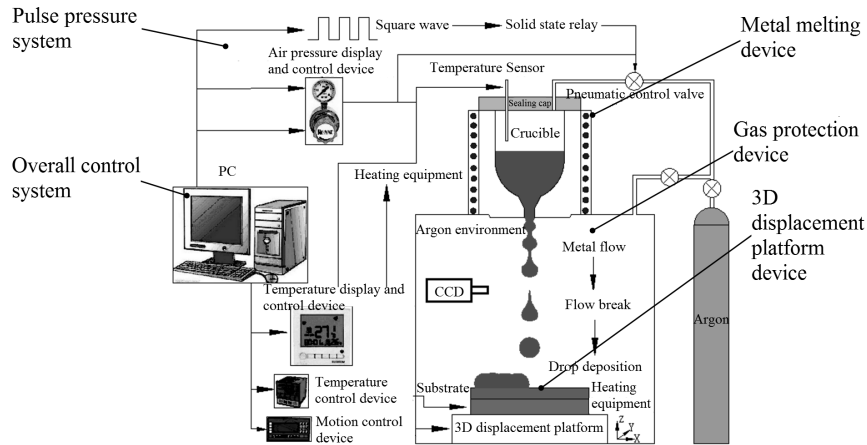


图 1 金属熔体沉积的实验装置

Fig.1 Experimental device for metal melt deposition

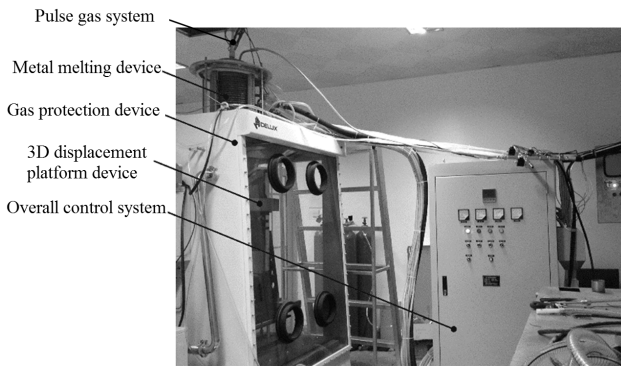


图 2 金属熔体沉积成形实验装置实物图

Fig.2 Physical diagram of metal melt deposition forming experimental device

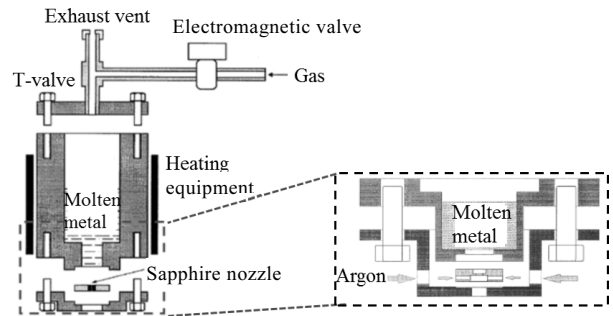


图 3 金属熔体发生器

Fig.3 Metal melt generator

## 2 金属熔体沉积成形实验平台搭建

### 2.1 金属熔炼装置

熔体发生器是熔体沉积装置中最为关键的部件。Cheng 等<sup>[10]</sup>针对低熔点锡金属熔体沉积装置进行了描述，如图 3 所示。该装置采用气动形式，主要构件有盛放熔融金属的不锈钢坩埚，利用电阻丝装置对坩埚里面的金属进行加热，将金属加热到熔点以上；喷嘴采用蓝宝石材料制成，安装在坩埚底部，以保证其使用要求；在未加压力之前，利用金属的表面张力可以防止熔融金属从喷嘴滴出；该装置采用的电磁阀的型号为 8262G232，直接连接在氩气瓶和盛放熔体的坩埚之间。在坩埚上方装有 T 形阀，其一端连接氩气瓶，另一端为出口，通向坩埚，主要用来调节坩埚里面气体的压力。利用其开、关为坩埚提供脉冲压力，调节

气体压力的大小，使坩埚内产生正负压，从而精确控制金属熔体的流速和滴落速度。但在熔融金属通过喷嘴喷出后，与空气接触极易氧化，这将对熔体沉积成形产生很大影响。熔融金属氧化后，其表面张力降低而粘度增加，从而使熔体液流沉积难度加大，从喷嘴沉积出的熔体直径变大。为防止熔融金属氧化，在坩埚底部的底板上安装一个直接供应氮气的出口，使喷嘴周围保持在一个封闭惰性气氛中。喷嘴利用粘合剂直接装在底板内，在底板上下两面都开有小孔，惰性气体氩气通过小孔进入喷嘴下面的熔融金属喷出部位可以防止氧化，通过调节气体流速可以在减少氧化的同时要保证对滴落熔体的影响最小。这种装置（图 3）电磁阀离坩埚出口较近，控制精度高，对于低熔点合金是合适的，但是对于高熔点金属，比如铝合金，铜合金等，坩埚内的熔融金属温度很高，致使里面气体温度很高，电磁阀承受不了高温，使用寿命大大降低。

为防止熔融金属氧化，采用图 3 方框中的氩气保护结构，但是气体压力不太容易控制，压力大可能会导致熔融金属吹斜，影响成形精度，压力小会使熔融金属氧化。

根据金属液流断续沉积的理论分析，本研究的金属熔炼装置包括熔体发生器一套，25 kW 中频电源一套。熔体发生器设计首先要求按照不同的材料可以沉积出不同大小的均匀微滴，其次要求金属熔炼装置可以更换孔径不同的喷嘴，即喷嘴具有易装卸的特点，并且要求喷嘴能够易于清洗。

中频电源采用目前技术最为成熟可靠的并联线路，并具有完善的保护功能。其控制线路中，整流触发器采用数字触发器，逆变触发器采用它激转自激和平均值控制技术，调节器采用无差抗脉冲的 PI 型调节器，整体线路采用集成电路集成在一块印刷板上，具有工作可靠，容易维修，抗干扰能力强的特点。主回路中，进线开关采用先进的自动断路器，结构紧凑，操作噪音小，使用寿命长。逆变可控硅采用大功率快速可控硅元件，因而整体设备的可靠性在元件选择上有较高的保证。熔体发生器本体中，采用感应加热装置，感应器采用优质 T2 紫铜管制作，然后整体浸漆、真空烘干。内有保温材料和耐火材料。采用石墨坩埚，石墨坩埚下部为熔融金属熔体出口，在炉盖上装有进气孔和温压传感器，气孔用于连接气路，温压传感器用来采集石墨坩埚内气体温度和压力。金属熔炼装置的结构示意图和实物图如图 4 所示。金属熔炼装置的技术参数如表 1 所示。

2.2 控制电源

该装置控制电源（如图 5 所示）采用电炉与电容器并联的联接方式；具有槽路短，流经逆变可控硅的电流小，逆变输出电压适中，槽路短路时易于保护的优点。电源的启动采用扫频启动技术，以适应不同炉况时的启动要求。逆变可控硅采用大功率快速可控硅，

表 1 金属熔炼装置的技术参数  
Table 1 Technical parameters for metal melting equipment

Parameter	Value
Rated capacity/kg	5
Maximum load/kg	10
Rated power/kW	25
Working frequency/kHz	1~4
Rated operating temperature/°C	1000
Cooling water pressure/MPa	0.2~0.3
Cooling inlet temperature/°C	5~40
Cooling water temperature/°C	55
Transformer capacity/kW	40
Line voltage/V	380

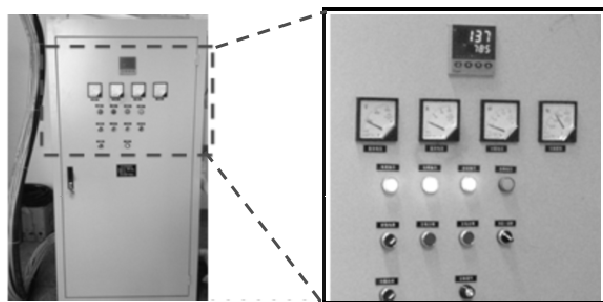


图 5 金属熔炼装置控制电源

Fig.5 Control power supply of metal melting device

其使用功率在额定值的 50% 以下，具有更高的可靠性。控制系统中，整流控制使用数字式触发器，调节部分采用 PI 调节器，逆变控制采用平均化处理的定角触发器。整个系统由于采用了如上的技术，使得整流脉冲均匀对称，逆变脉冲稳定可靠，电流、电压调节精确，电源整体运行平稳。系统设有过流、过压、截流和截压及外部保护（比如水温、水压等保护）。

2.3 气体保护装置

为保证金属沉积成形过程中不会出现频繁堵塞喷嘴以及熔体被氧化的现象，对气体保护装置的氧含量有一定要求。气体保护系统采用循环除氧装置构成无氧环境。为防止熔炼金属时保护箱内部温度过高，箱体顶部是高纯氩气入口，安装有冷却系统，配备箱体式空调，与底部形成冷却风幕对箱体内的温度进行冷却控制，箱体左侧有备用接口。右侧有大过渡舱（DN385 mm×588 mm），小过渡舱（DN109 mm×290 mm），方便物料的进出。如图 6 所示。箱体采用 3 mm 不锈钢板制作，内表面磨砂，外表面喷塑处理，箱体尺寸为：1200 mm×1030 mm×2527 mm（长×宽×高），箱体底部加筋，可以直接盛放 3D 位移平台，不需要机架。箱体的左侧预留一个视窗，方便观察箱体内打印机的工作情况。气体保护装置的技术规格如表 2 所示。

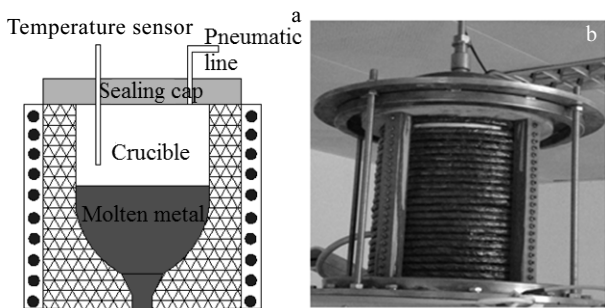


图 4 金属熔炼装置结构示意图和实物图

Fig.4 Schematic (a) and physical diagram (b) of structure of metal melting device

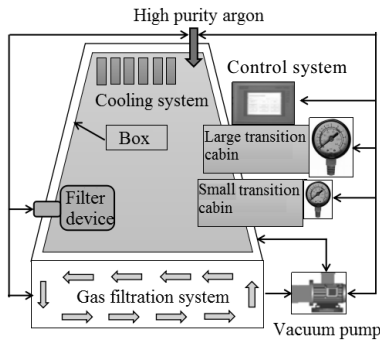


图 6 气体保护装置示意图

Fig.6 Schematic diagram of gas protection device

表 2 3D 打印机手套箱技术参数

Table 2 Technical parameters of 3D printer glove box

Water content in the tank under standard conditions/mg·L <sup>-1</sup>	≤1
Oxygen content in the tank under standard Conditions/mg·L <sup>-1</sup> (the standard condition is one atmosphere, 20 °C)	≤1
The vacuum value transition chamber can withstand/Pa	≤100
Box leakage rate (20 °C)/vol%·h <sup>-1</sup>	≤0.05

### 2.4 3D 位移平台

金属熔体沉积成形实验系统中的 3D 运动平台主要用来实现沉积平台的三维运动，控制金属熔体，按照精确的轨迹路径，逐点沉积、逐层堆积出零件。因此，运动平台必须具有较高的定位精度和重复定位精度，并且给进装置中的机械传动部件和导向部件都要具有较高的灵敏性和较低摩擦阻力。依据金属熔体沉积成形工艺特点和成形零件的尺寸要求，按照图 7a 所示流程对运动平台进行设计。具体如下：首先确定出各个运动轴的有效行程、最大加速度、最大运动载荷、定位精度以及加热基板的最大承受载荷、最大台面尺寸、加热温度、热变形、平面度等性能指标，在此基础上进行各个运动轴的尺寸结构设计、材料选取、零部件选取和装配方案的确定。同时，采用三维建模软件 UG 对设计方案进行可视化构建，通过零部件的虚拟装配、干涉分析，载荷变形分析，进一步优化设计方案。

由于坩埚中盛放金属较多，故应避免坩埚运动过程中造成的金属液面晃动和运动形成的惯性误差。为保证成形精度，采用金属熔体装置不动，3D 位移平台装置采用 X-Y-Z 运动形式。根据成形零件的尺寸大小，具体技术要求如表 3 所示。拟成形零件最大有 3.6 kg，

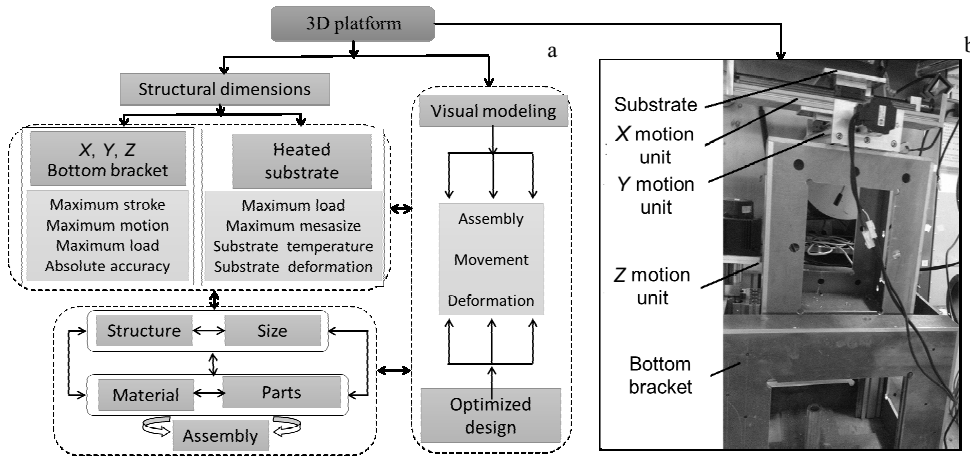


图 7 3D 位移平台结构图

Fig.7 Structure diagram of 3D displacement platform: (a) platform design process and (b) platform physical diagram

且考虑留有一定的余量，所以在进行设计时，负载为 5 kg。设计基板移动位移为 400 mm×400 mm，高度方向的运动位移为 500 mm，坩埚安装在 Z 轴上，通过直角支架运动实现垂直移动。台面尺寸为 400 mm×400 mm。为保证基板能和成形的物件更好地熔合，需要对基板进行加热，加热温度为 273~500 K，并实时可调。加热形式为电阻丝加热，利用热电偶（型号：TT-K-20，

Omega Inc. Stamford, CT）安装在基板表面的孔中以便通过温度控制器（CN9000A, Omega Inc. Stamford, CT）控制基板温度。为保证成形的精度，设计 3D 位移平台的绝对定位精度、平面度、运动精度以及平台的热变形量分别为 0.005、0.005、0.01、≤0.01 mm。为保证成形效率，3D 位移平台的移动速度最大为 30 mm/s，实物图如 7b 所示。

表 3 3D 位移平台的技术要求

Parameter	Value
Load/kg	5
Stroke/mm	400×400×500 (X×Y×Z)
Table size/mm	400×400
Positioning accuracy/mm	0.005
Maximum moving speed/mm·s <sup>-1</sup>	30
Maximum heating temperature/°C	500
Flatness/mm	0.005
Motion accuracy/mm	0.01
Platform thermal deformation/×10 <sup>-6</sup> m	≤10

The bottom of the platform should be fixed to the cabinet

### 3 金属熔体成形控制系统研发

#### 3.1 脉冲气压控制系统

金属熔体沉积成形脉冲控制部分主要用于控制坩埚内熔融金属的脉冲压力。通过对坩埚内压力测试，显示压力是呈振荡变化的，先正压然后降成负压，其振荡频率取决于坩埚的空间大小，熔体的尺寸主要与喷嘴的尺寸有关。坩埚内压力通过气压控制调节。控制系统通过工控机输出开关信号控制气路中的负压阀和正压阀开启与闭合，以控制脉冲压力的加载与卸载；通过输出模拟信号控制调整精密调压阀，以控制脉冲压力调节。其控制原理如图 8 所示。

#### 3.2 金属熔体沉积成形控制软件的设计与开发

金属熔体沉积成形过程基本可以分为前期准备阶段和打印阶段。前期准备阶段主要是熔炼金属、基板预热以及氩气保护装置启动。在熔炼金属之前，需要开启水冷系统，以防管路由于高温受损。金属采用感

应加热，加热到设定温度、压力后开始保温，同时基板由电阻丝加热到设定温度，通过氩气保护装置使周围空气含量达到 20 mg/L 以下。同时满足要求后，开启脉冲气压装置，调出打印的模型，开始打印。打印结束后，关掉脉冲运动装置，金属熔炼系统，取出制品。

金属熔体沉积成形实验装置控制软件是按需液流 (drop on demand, DOD) 沉积成形过程顺利进行的基础和保证。因此，控制对象包括：(1) 平台运动状态、电磁阀开关、当前层信息以及坩埚内压力的显示、设定和控制；(2) 可编程控制器 (programmable logic controller, PLC) 扫描速度、延时时间以及通讯接口等处的参数设定和控制；(3) 打印文件、每层信息以及打印图形等实时显示和监测；(4) 基板运动、控制器状态以及电机等系统的运动测试、监测及调试，如图 9 所示。通过该软件实现处理\*.3dp 格式文件、生成运动路径轨迹、显示每层加工信息、控制和读取 PLC

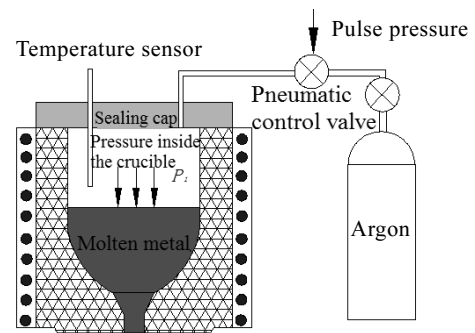


图 8 脉冲控制系统

Fig.8 Pulse control system

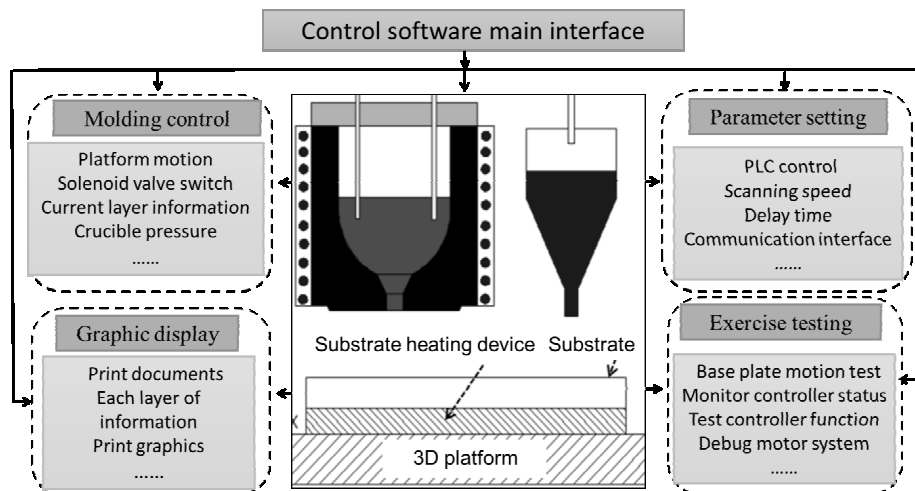


图 9 软件结构

Fig.9 Software structure

信息、查看和监控控制器状态、测试控制器不同功能、调试电机系统、实时进行状态记录等功能。根据以上功能,采用 Delphi 7 语言进行编程。主要包括成形控制、图形显示、文件选择、参数设定、运动测试、状态记录和帮助文件 7 个部分。“成形控制界面”项用于成形时快速设置成形平台运动状态、电磁阀自动打印开关、加工零件当前层信息以及当前坩埚里面的压力显示的界面。“文件选择界面”用于显示打开的 3DP 文件,数据内容会显示在左侧空白处,上下滑动鼠标查看文件信息。“参数设置界面”用于金属熔体沉积成形的外部 PLC 控制、系统在快速成形时的运动参数控

制,并预留了串口通讯接口。“运动测试界面”用于平台运动测试、查看和监控控制器状态、测试控制器不同功能、调试电机系统等。

图 10a 为德国英福泰克 (InfraTec) 热像仪。该热像仪的像素分辨率为  $640 \times 512$ ,用此设备可以清晰地监测高速下落的金属微熔体温度场分布,如图 10b 所示。其脉冲压力为  $0.4 \text{ MPa}$ ,  $f=40 \text{ Hz}$ ,喷嘴直径为  $0.5 \text{ mm}$ ,材料为 Sn63-Pb37 合金,坩埚内部熔体温度为  $550 \text{ K}$ 。可见金属熔体滴落稳定后的形貌接近于圆球形,与 CCD 拍摄的形貌有较好的一致性,如图 10c 所示。

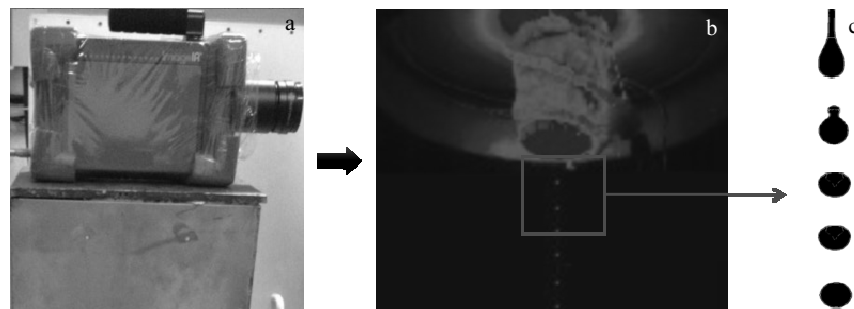


图 10 样件表面温度采样

Fig.10 Sample surface temperature: (a) infrared thermal imager, (b) observation results, and (c) evolution process of droplet morphology

## 4 结 论

通过此金属熔体沉积实验装置的研究,实现了熔体沉积成形过程中工艺参数的设置、数据的采集和控制,为研究金属熔体液流沉积成形技术提供了必要的实验基础。

### 参考文献 References

- [1] Bellizia G, Megaridis C M, McNallan M *et al.* *Proceedings of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*[J], 2003, 459(2037): 2195
- [2] Zuo Hansong(左寒松), Li Hejun(李贺军), Qi Lehua(齐乐华) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(8): 1596
- [3] Chun J H, Passow C. *CIRP Annals*[J], 1993, 42: 235
- [4] Yang Guan(杨 关), Qi Lehua(齐乐华), Luo Jun(罗 俊) *et al.* *Chinese Journal of Scientific Instrument*(仪器仪表学报)[J], 2009, 30(3): 590
- [5] Tseng A A, Lee M H, Zhao B. *ASME J Eng Mat Tech*[J], 2001, 123: 74
- [6] Zhang Xiaoping(张晓萍), Yan Yongnian(颜永年), Yuan Xiaomeng(袁晓蒙). *China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2000, 11(10): 1101
- [7] Wang Tianming(王天明), Jin Ye(金 烨), Xi Juntong(习俊通). *Journal of Shanghai Jiaotong University*(上海交通大学学报)[J], 2006, 40(7): 1230
- [8] Li Suli(李素丽), Wei Zhengying(魏正英), Lu Bingheng(卢秉恒). *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2014, 11: 5
- [9] Li Suli(李素丽), Wei Zhengying(魏正英), Lu Bingheng(卢秉恒). *Journal of Zhengzhou University, Engineering Science*(郑州大学学报, 工学版)[J], 2014(7): 124
- [10] Cheng S X, Li T, Chandra S. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2005, 159(3): 295

## Experimental Device Study on Metal Melt Deposition

Li Suli<sup>1,2</sup>, Yang Laixia<sup>1</sup>, Wang Li<sup>2</sup>, Lu Bingheng<sup>2</sup>

(1. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

(2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Metal melt deposition involves thermo-physical processes such as the formation, morphological evolution, flow and solidification of metal melts. According to the discontinuous characteristics of liquid metal flow, a metal melt deposition device was designed and developed. The results show that the monitoring and control of the key parameters (pulse pressure, scanning speed, melt temperature, substrate temperature, etc.) in the process of metal melt deposition is realized by this experimental device study, which provides the necessary experimental software and hardware basis for the further study of melt deposition forming technology.

**Key words:** metal melt; experimental device; pulse pressure; pulse frequency

---

Corresponding author: Yang Laixia, Ph. D., Professor, College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, P. R. China, Tel: 0086-29-85583114, E-mail: 867368760@qq.com