

# 金属熔体喷射沉积特性分析

李素丽<sup>1,2</sup>, 杨来侠<sup>1</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:** 针对金属熔滴沉积增材制造中金属液流断续随机性变化、断续形貌等参数难以控制和预测的现存问题, 采用理论分析与试验研究相结合的方法, 对金属液流断续过程中的断续形貌及其影响因素脉冲压力、脉冲频率等进行了研究, 揭示了断续形貌长度分布规律。结果表明: 通过调节脉冲气压和脉冲频率, 可以提高金属液流断裂的形态精度和尺寸精度, 可为后续制造过程提供稳定的均匀微滴流。

**关键词:** 金属熔体; 断续沉积; 脉冲压力; 脉冲频率; 沉积形貌

**中图分类号:** TG44

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2019)07-2232-07

金属熔滴沉积 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, 通过控制金属熔滴沉积轨迹, 进行逐点、逐层沉积, 直至成形出复杂零件<sup>[1]</sup>。

目前, 对该技术的研究主要通过试验与数值模拟 2 种方法进行。一方面, 采用试验研究的方法探索均匀液滴喷射的机理。MIT 的 Chun 教授通过试验研究了锡铅合金均匀液滴喷射技术, 采用经验公式推导了喷射压力、激振频率等喷射参数与液滴直径的关系, 通过对液滴充电的方法防止液滴在飞行过程中融合, 提高了金属熔滴的均匀性<sup>[2]</sup>。在此基础上, 采用低温合金材料制备了粒度 75~800  $\mu\text{m}$  的锡、铝、铜合金等粉末<sup>[3]</sup>。Tseng<sup>[4]</sup>研究了不同喷嘴直径、射流速度和扰动频率下的金属液滴喷射。

国内北京有色金属研究总院为了探索新型无铅焊料在电子封装上的应用<sup>[5]</sup>, 采用连续式均匀液滴喷射技术, 研究毛细波动对金属射流断裂的影响<sup>[6]</sup>, 测量了金属锡熔体在不同喷嘴直径下的压力-速度曲线, 并研究了表面波波长和激振频率的关系, 制备了均匀焊料颗粒(Sn-4.0Ag-0.5Cu)<sup>[7]</sup>。

目前, 国内外已有研究多注重金属喷射与熔滴形态变化的分析, 并未结合金属液流和熔滴速度与脉冲变化进行系统研究。通过研究金属熔滴沉积速度和脉冲压力等物理场的变化, 选择合适的沉积参数, 提高熔滴的精度仍然是均匀熔滴沉积技术需要解决的重要问题。

本研究采用理论与试验相结合的研究方法, 建立了金属熔体断续沉积简化解析模型, 分析了在脉冲压力作用下金属熔体沉积的影响因素和动态变化规律。

## 1 金属液流断续特性数值分析

### 1.1 模型建立及工艺参数分析

假设金属熔体液流为不可压缩的流体, 且液流过程无热损失。密度为  $\rho$ , 表面张力为  $\sigma$ , 喷嘴内孔为圆形, 半径为  $D_0$ 。以液流轴线为对称轴建立坐标系, 液流方向为  $z$  正方向。当对液流施加轴向方波脉冲压力时, 金属液流仍会保持轴对称状态, 但内部会产生压力波动。在压力波动与金属表面张力的作用下, 金属液流会产生劲缩、断续形态, 逐渐形成直径为  $D$  的圆球, 如图 1 所示。

### 1.2 工艺参数对熔滴成形的影响

本实验采用的 Sn63-Pb37 合金熔体材料, 液流沉积物性参数如表 1 所示, 合金液流工艺参数如表 2 所示。

### 1.3 金属液流熔滴断续分析

图 2 为典型的金属熔滴液流沉积形态演变过程。由图可知, 整个过程可分为金属液流挤出、颈部收缩、熔滴成形及沉积铺展 4 个阶段。在金属液流挤出阶段, 对熔融金属施加正向压力, 使得坩埚内部压强迅速上升, 熔融金属向下运动, 坩埚底部的腔体区域压强最大, 熔融金属通过喷嘴挤出, 如图 2b 所示。在颈部收缩阶段, 脉冲压力停止加压, 坩埚内部整体压力减小, 喷嘴处熔体压力的陡然减小导致金属液流产生局部颈

收稿日期: 2018-07-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863”计划)(2015AA042503-2); 陕西省自然科学基金项目重点项目 (2012JZ7001)

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

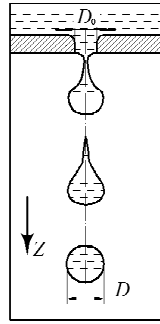


图 1 金属熔滴液流脉冲气压断续模型

Fig.1 Model of metal droplet intermittent in pulse pressure

表 1 熔滴物性参数

Table 1 Physical parameters

Physical parameter	Value
Density, $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	8520
Viscosity, $\mu/(\text{N}\cdot\text{s})\cdot\text{m}^{-2}$	$1.3\times 10^{-3}$
Surface tension, $\sigma/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	0.48
Thermal conductivity, $k/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	31.7
Specific heat, $C/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	212.9
Solid temperature, $T_s/\text{K}$	456
Liquid temperature, $T_l/\text{K}$	456
Latent heat of fusion, $L/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	47560

表 2 合金液流工艺参数

Table 2 Process parameters of alloy liquid flow

Process parameter	Value
Melt temperature, $T_d/\text{K}$	550
Nozzle diameter, $D_0/\text{mm}$	0.5
Substrate temperature, $T/\text{K}$	300
Deposition distance, $h_s/\text{mm}$	3~10
Pulse pressure, $P/\text{MPa}$	0.3~0.5
Pulse frequency, $f/\text{Hz}$	30~60
Environmental oxygen content/ $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$	20

缩。而喷嘴外部的熔体柱则继续下落，金属熔滴形状初步形成，如图 2c 所示。第 3 阶段为熔滴成形阶段，随着金属熔滴下落及腔体内熔体的回流，喷嘴内金属熔滴回流速度逐渐增大。最终，金属熔滴脱离空腔内液体，形成独立金属熔滴，断续过程如图 2d 所示。金属熔滴断续之后，由于自身表面张力作用，逐渐形成圆球形，如图 2e~2g。第 4 阶段为金属熔滴沉积成形阶段，随着下落进行，在金属粘性的表面张力作用下，金属熔滴头部速度逐渐增大，尾部速度逐渐减小。在整个下落过程中，金属熔滴头部和尾部的速度差逐渐地减小，最终金属熔滴达到较为稳定的状态，成为一个近似圆形的球体，具体如图 2h 所示。采用与数值模拟相同工艺参数，环境氧含量在 20  $\mu\text{L}/\text{L}$  以下，用 CCD 进行对 1 个脉冲频率下，单颗熔滴沉积形成过程进行拍摄，所得形貌如图 3 所示。由图可以看出，数值模拟和实验拍摄形貌有很好的 consistency，证明了模型的正确性。

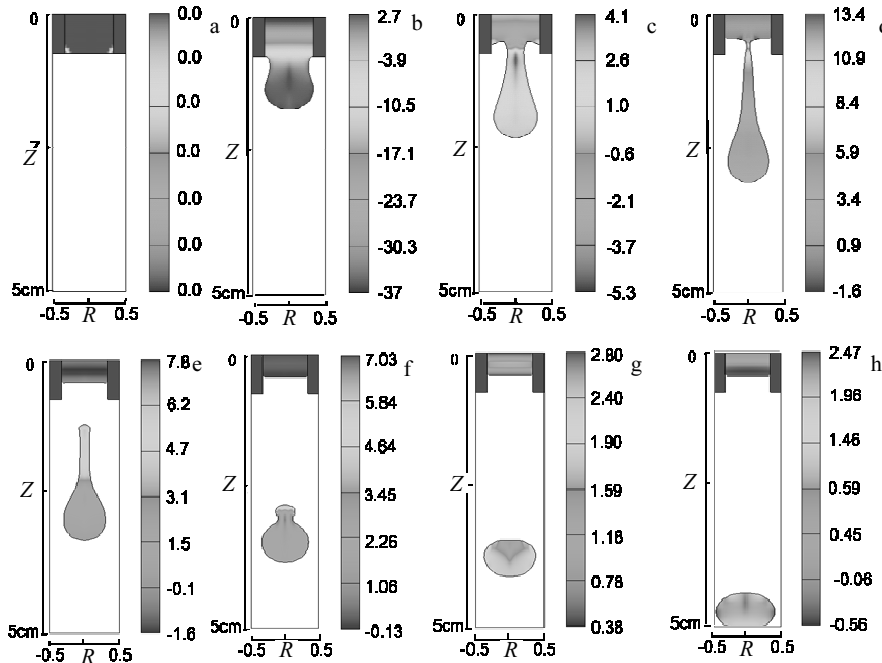


图 2 金属液流熔滴沉积过程

Fig.2 Molten metal drop deposition process: (a) 0 ms, (b) 3.3 ms, (c) 6.8 ms, (d) 10 ms, (e) 13.5 ms, (f) 15 ms, (g) 21.6 ms, and (h) 25 ms

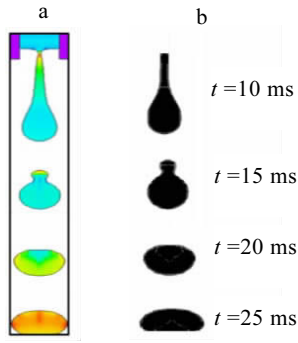


图 3 金属液流沉积过程数值计算和实验验证

Fig.3 Numerical calculation (a) and experimental verification (b) of metal deposition process

为研究熔体形态演变过程，寻求最佳工艺参数窗口。在金属液流断续阶段，由于金属熔滴的头部和尾部存在速度差，并且断续液流较长，因此考察金属熔滴的头部与尾部速度比考察金属熔滴沉积速度更有意义，如图 4 所示，定义断续形成的金属熔滴长度  $L$ ，金属熔滴头部位移  $D_h$  以及金属熔滴尾部位移  $D_t$  为研究参数。图 5 为液流过程中金属熔滴头部及尾部金属熔滴位移的变化曲线，以脉冲气压开始响应的 0.2 ms 作为开始测量的时间点。金属熔滴首先处于拉伸状态，断续后，变为收缩状态，逐渐变成圆球状。

### 1.4 脉冲压力及频率对金属液流的影响

实际在均匀金属熔滴液流试验中，影响液流断续的试验参数众多<sup>[8]</sup>，如何在液流过程中有效地控制各试验参数，是能否成功液流均匀金属熔滴的关键。因此，需分析主要试验参数对金属液流断续行为的影响。本工作研究的 Sn63-Pb37 合金熔滴液流断续过程中，喷嘴直径一定的情况下，通过调整脉冲压力和脉冲频率，都可以形成较均匀的金属熔滴。

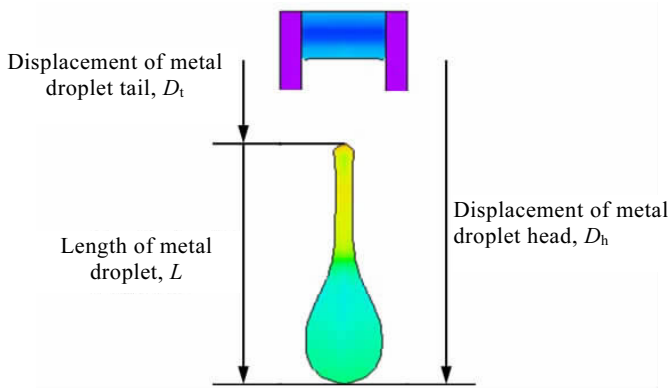


图 4 金属熔滴液流断续示意图

Fig.4 Intermittent flow diagram of metal droplet

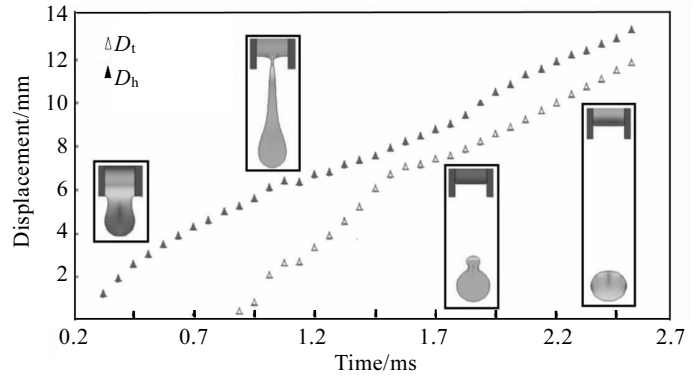


图 5 金属熔滴液流头部、尾部位移变化关系

Fig.5 Displacement of head and tail of metal droplet

脉冲压力及脉冲频率越大，形成比较圆整的均匀金属熔滴与喷嘴距离越远，如图 6 所示。分别测量模拟结果中的熔滴间距  $S$  与断续长度  $L$ ，得到与液流气压  $P$  的关系。当脉冲压力  $P=0.3$  MPa,  $f=30$  Hz 时，此时金属液流断续长度  $L=1.45$  mm，形成较完整的熔滴与喷嘴距离： $S=1.5$  mm，如图 6a 所示；当  $P=0.4$  MPa,  $f=40$  Hz 时，金属液流断续长度  $L=2.5$  mm,  $S=3.7$  mm，如图 6b 所示；当  $P=0.5$  MPa,  $f=50$  Hz 时，断续长度  $L=3.5$  mm,  $S=6.2$  mm，如图 6c 所示。可见，当脉冲气压增大时，金属液流断续长度增大，形成较完整熔滴与喷嘴的距离增大，如图 7 所示。

图 8a 为德国英福泰克 (InfraTec) 热像仪。该热像仪的像素分辨率为  $640 \times 512$ ，用此设备可以清晰的监测高速下落的金属微熔体温度场分布，如图 8b 所示。其脉冲压力为 0.4 MPa,  $f=40$  Hz，喷嘴直径为 0.5 mm，材料为 Sn63-Pb37 合金，坩埚内部熔体温度为 550 K。可见，金属熔滴滴落稳定后的形貌，接近于圆球形，与 CCD 拍摄的形貌有较好的一致性，如图 8c 所示。

实验过程中，分别采集不同时刻  $t_1$ ,  $t_2$  下微滴飞行的两帧图像，通过图像处理算法确定出 2 帧图像中微滴的中心坐标位置  $(x_i, y_j)$ ，利用公式 (1) 可计算出熔滴在此时间间隔内的平均速度<sup>[3-6]</sup>，具体如图 9 所示。

$$V = \frac{L}{\Delta t} = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2}}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

其理论计算结果与实验测量结果的比较如图 10 所示。试验测量的沉积速度平均值与理论预测值变化趋势一致，测量的平均值与理论结果相符也较好。但图中也显示，理论与试验结果之间存在一定的差别，这可能是由于实验系统的系统随机扰动(如环境振动、坩埚内熔体温度以及环境温度的波动、氧含量的波动、材料的纯净程度、喷嘴的洁净程度等)造成的。

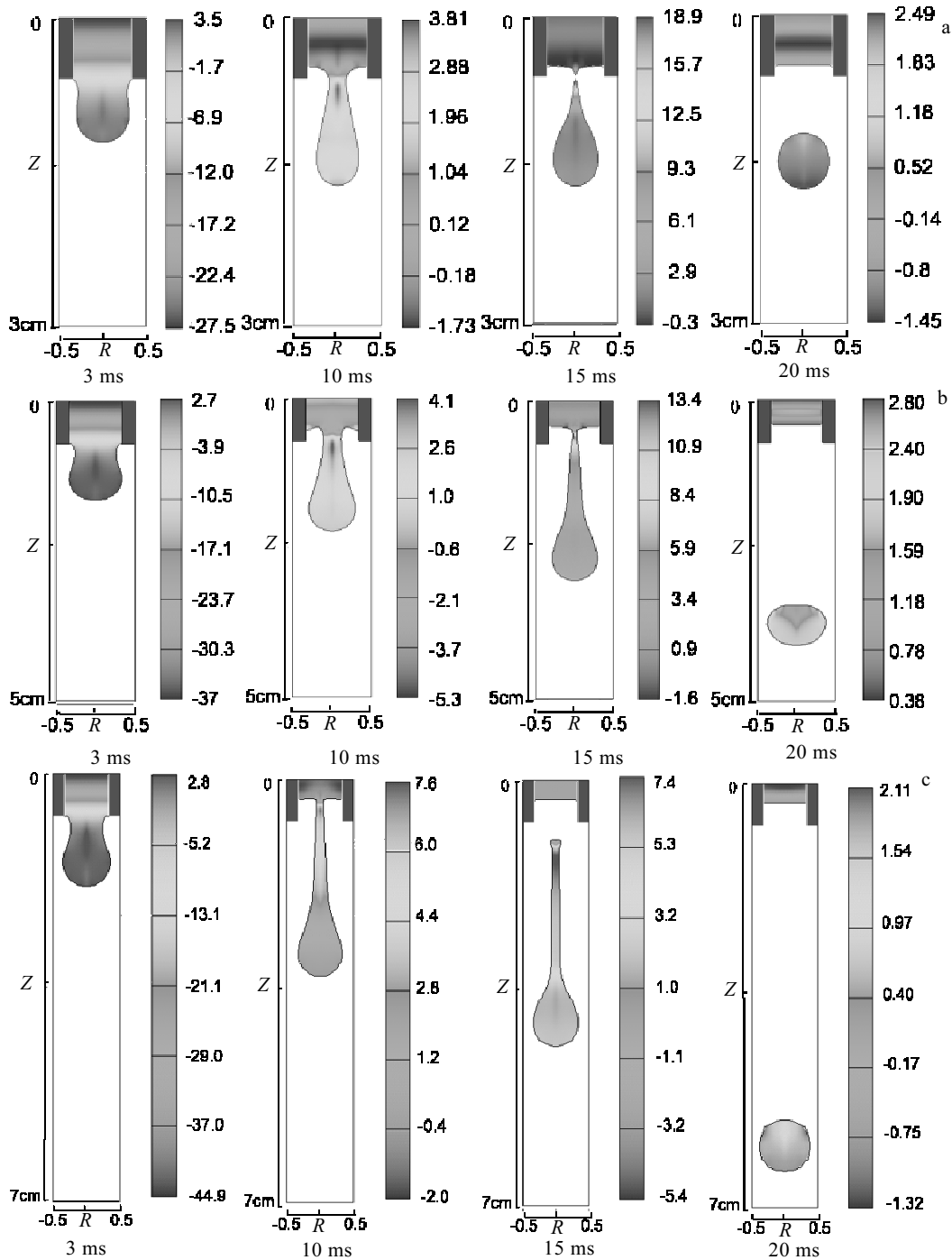


图 6 金属液流形貌与脉冲压力之间的关系

Fig.6 Relationship between the pulse pressure and metal morphology: (a)  $P=0.3$  MPa,  $f=30$  Hz; (b)  $P=0.4$  MPa,  $f=40$  Hz; (c)  $P=0.5$  MPa,  $f=50$  Hz

## 2 不同工艺参数对熔滴成形实验验证

### 2.1 脉冲压力 $P$ 对熔滴成形的影响

金属液流断续沉积过程中脉冲压力的选择与喷嘴直径、金属熔体与喷嘴材料的润湿性及熔体加热温度等因素有关。当脉冲压力较小时，金属熔体不会从喷嘴挤出，此时必须加大脉冲压力从而使坩埚内压力增

大，能够使金属熔体克服表面张力从喷嘴挤出形成熔滴；当脉冲压力过大时，金属熔体的表面张力不足以克服重力，熔体会直接从喷嘴流出，此时需要施加负压，即：坩埚中的压力要小于外界的压力，才能够保证金属液流能够稳定的流出并断续形成熔滴；熔体温度对其粘度有较大的影响，如果金属熔体过热，其粘度就会降低，在较小的脉冲压力下，金属熔体就

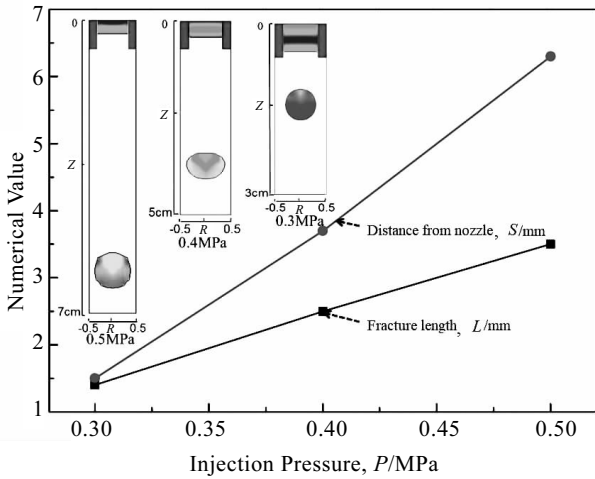


图 7 金属液流形貌与脉冲压力间的关系曲线

Fig.7 Relationship between metal flow morphology and pulse pressure

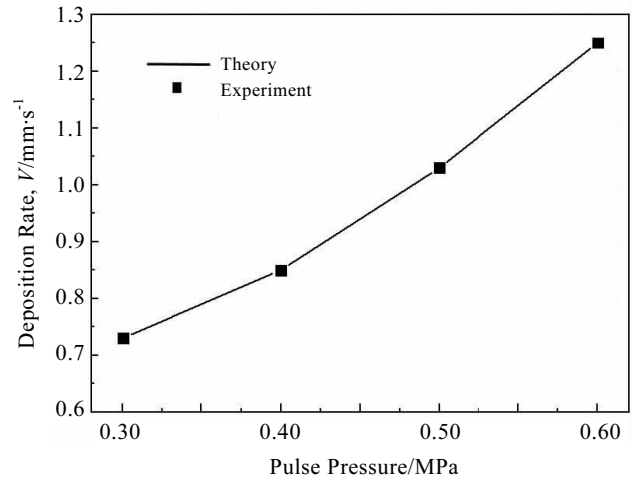


图 10 沉积速度与脉冲压力的关系

Fig.10 Relationship between deposition rate and pulse pressure

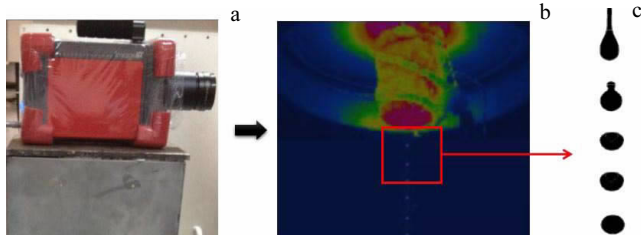


图 8 样件表面温度采样

Fig.8 Sample surface temperature: (a) infrared thermal imager, (b) observation results, and (c) evolution process of droplet morphology

会从喷嘴处流出；坩埚、喷嘴材料与金属的润湿性也是决定熔滴能发成形的关键因素之一。实验条件：脉冲频率 30 Hz，喷嘴直径 0.4 mm，熔体温度 550 K，脉冲压力对熔滴成形的影响如图 11 所示。

从图 11 可以看出，脉冲压力对金属熔滴成形有较大的影响。随着脉冲压力的增大，熔滴直径显著增大。这主要是由于随着脉冲压力的增大，坩埚内压力也在增大，从喷嘴处流出的熔体体积增大，熔体的流速增加。

### 2.2 脉冲频率 $f$ 对熔滴成形的影响

脉冲频率对制件的成形效率有一定的影响，保持

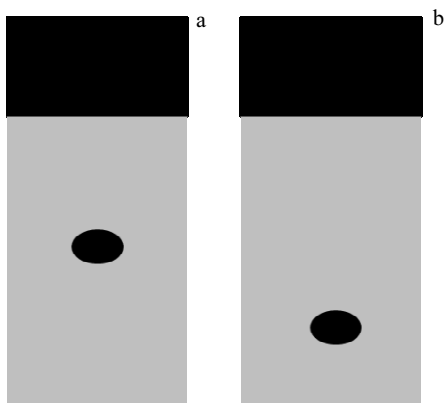


图 9 熔滴沉积速度测量

Fig.9 Velocity measurement of droplet deposition: (a)  $t_1$  and (b)  $t_2$

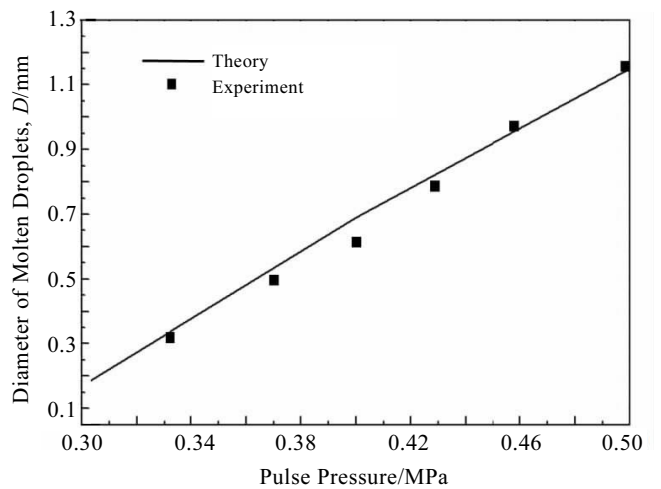


图 11 脉冲压力与熔滴直径的关系

Fig.11 Relationship between droplet diameter and pulse pressure

其他实验条件不变：脉冲压力 0.4 MPa，喷嘴直径 0.6 mm，熔体温度 550 K，不同脉冲频率对熔滴成形的影响如图 12 所示。从图中可以看出，脉冲频率对熔滴成形的尺寸没有明显的影响。但是过高的脉冲频率不容易控制，给成形过程提出更高的要求。

### 2.3 金属熔滴成形均匀性分析

本实验主要对金属液流稳定断续情况下产生熔滴均匀性进行分析。实验采用的喷嘴直径为 0.6 mm，喷射材料为锡铅合金 (Sn63-Pb37)。将 Sn63-Pb37 放入坩埚，加热到设定温度 (550 K) 后保温 15 min 进行沉积。在稳定沉积的基础上，随机收集沉积出的金属熔滴，将其表面清理干净后，在显微镜下观察颗粒的球形度，考查熔滴尺寸的均匀性。当脉冲频率为 30 Hz，脉冲压力为 0.3 MPa 时，球形颗粒圆度较好，尺寸一致。对收集的 139 个颗粒 (如图 13a 所示)，采用光学

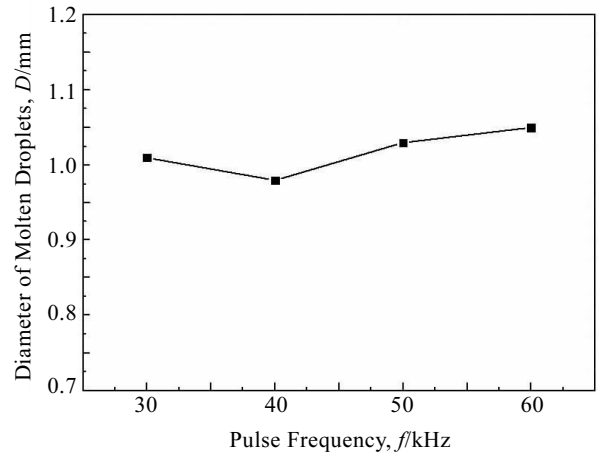


图 12 脉冲频率与熔滴直径的关系

Fig.12 Relationship between droplet diameter and pulse frequency

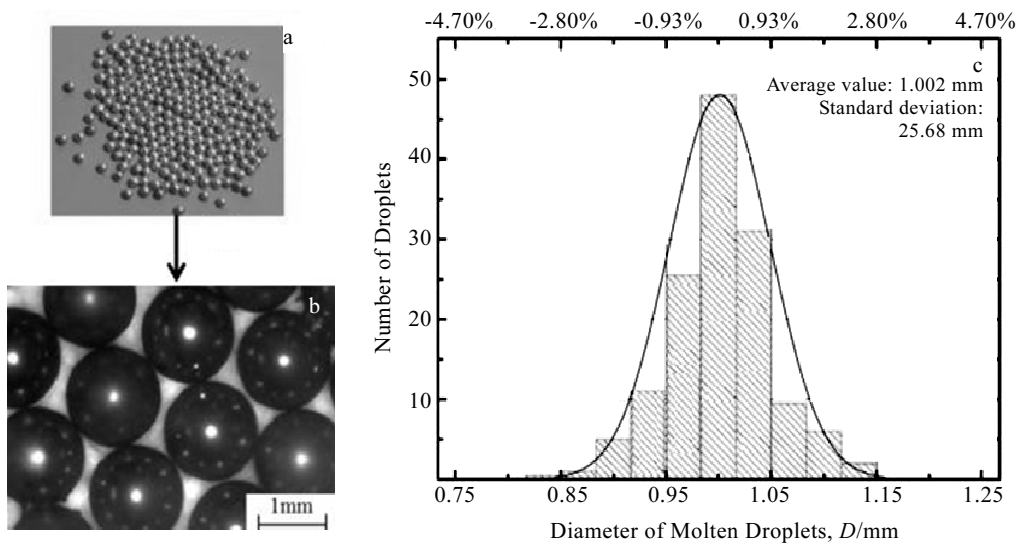


图 13 熔滴形貌及分布图

Fig.13 Droplet distribution: (a) collected 139 particles, (b) OM image, and (c) particle size distribution

显微镜观察 (如图 13b 所示) 并对其直径逐个测量，统计其尺寸分布特征，平均直径为 1.002 mm，尺寸偏差为 25.68  $\mu\text{m}$ ，约 99% 的颗粒分布在平均直径  $\pm 2.8\%$  附近区间内，表明产生的微滴尺寸分布集中、均匀性较好，如图 13c 所示。

## 3 结论

1) 分析了金属液流受脉冲气压断续为均匀熔滴的行为机理，建立了金属液流控制方程，研究了在微小杂质的干扰下，金属液流易产生偏斜，增大脉冲气压减小了金属液流的偏斜角，但仅依靠增大气压无法完全消除局部杂质的干扰。通过净化装置、原材料去杂，有效防止了杂质对液流偏斜的影响。

2) 研究了金属液流断续行为，采用线性不稳定理论得到了脉冲频率以及脉冲压力与坩埚内压力间的关系曲线，说明脉冲压力显著改变坩埚内压力的幅值。当脉冲压力  $P=0.3$  MPa， $f=30$  Hz 时，此时金属液流断续长度  $L=1.45$  mm，形成较完整的熔滴与喷嘴距离  $S=1.5$  mm；当  $P=0.4$  MPa， $f=40$  Hz 时，金属液流断续长度  $L=2.5$  mm， $S=3.7$  mm；当  $P=0.5$  MPa， $f=50$  Hz 时，断续长度  $L=3.5$  mm， $S=6.2$  mm。当脉冲气压增大时，金属液流断续长度增大，形成较完整熔滴与喷嘴的距离增大。

3) 金属熔滴成形过程主要受喷嘴直径、脉冲压力和脉冲频率的影响，通过改变以上实验参数可以获得不同尺寸熔滴，得出：增大脉冲气压，金属熔滴尺寸

明显增大, 而脉冲频率对熔滴成形的尺寸没有明显的影响。当喷嘴直径为 0.6 mm, 脉冲频率为 30 Hz, 脉冲压力为 0.3 MPa 时, 其熔滴的平均直径为 1.002 mm, 尺寸偏差为 25.68  $\mu\text{m}$ , 约 99% 的颗粒分布在平均直径  $\pm 2.8\%$  附近区间内, 表明产生的微滴尺寸分布集中、均匀性较好。

#### 参考文献 References

- [1] 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
- [2] Chun J H, Passow C. *CIRP Annals*[J], 1993, 42: 235
- [3] Yang Guan, Qi Lehua, Luo Jun et al. *Chinese Journal of Scientific Instrument*[J], 2009, 30(3): 590
- [4] Tseng A A, Lee M H, Zhao B. *ASME J Eng Mat Tech*[J], 2001, 123: 74
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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

## Characteristics Analysis of Metal Melt Spray Deposition

Li Suli<sup>1,2</sup>, Yang Laixia<sup>1</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:** Since metal flow intermittent changes randomly and intermittent morphology parameters are difficult control and forecast in the metal droplet deposition additive materials manufacture, metal flow discontinuous intermittent morphology and its influencing factors including pulse pressure and pulse frequency were studied. The results show that by adjusting the pulse pressure and pulse frequency, fracture shape accuracy and dimensional accuracy of the metal flow can be improved, which provides stable uniform micro drip for the subsequent manufacturing process.

**Key words:** metal melt; intermittent deposition; pulse pressure; pulse frequency; sedimentary morphology

---

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