

金属熔滴沉积成形三维零件的工艺研究

李素丽^{1,2}, 刘伟³, 杨来侠¹, 高扬¹, 徐超¹, 张文明¹, 卢秉恒²

(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)

(3. 陕西国防工业职业技术学院, 陕西 西安 710300)

摘要:通过对单颗金属熔滴沉积行为的研究,建立了三维实体零件搭接成形数值计算模型,探索了金属熔滴在小空间、大温度梯度下沉积成形中熔体流动、铺展、凝固成形机理,揭示了典型特征截面上搭接成形时,熔滴沉积中的主要特征因素对成形形貌、内部质量的影响。结果表明,在脉冲压力 $P=0.4$ MPa、脉冲频率 $f=40$ Hz、熔体温度 $T_a=550$ K、基板温度 $T=400$ K、基板与喷嘴间距离 $h_s=5$ mm、喷嘴直径 $D_0=0.7$ mm 时,成形制件的层厚 $S_y=2.22$ mm,其内部没有明显的孔洞,致密度较好。

关键词:金属熔滴; 三维零件; 成形工艺; 搭接率; 平整度

中图分类号: TG47

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)02-0626-06

兴起于 20 世纪 90 年代初的金属熔滴沉积工艺是一种新型金属零件快速成型技术。该技术是基于离散/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^[1]。与目前主流的 SLS、SLM、LCD、EBM 技术相比,该技术采用电磁感应加热,具有设备成本低及成形效率高等优点,在三维零件制造等领域具有广泛应用前景^[2]。

美国东北大学高级材料处理实验室、美国橡树岭国家实验室、美国 Microfab 公司、加拿大多伦多大学、日本大阪大学对该技术进行了深入研究,但目前没有进行制件成形研究^[3]。北京有色金属研究总院复合材料中心为了探讨低熔点合金在电子封装上的应用,试验研究了金属液流断续的规律,并制备了无铅焊料 (Sn-4.0Ag-0.5Cu) 均匀颗粒^[4];天津大学理学院研究了均匀金属合金粉末的制备方法,并对铅锡合金颗粒的异质成核及其冷却凝固行为进行了建模预测^[5];台湾国立成功大学航太研究所开展了均匀金属熔滴的快速原型制造技术^[6]的研究,开发了金属熔滴液流试验装置,但只研究了均匀金属熔滴的成形。

由于金属材料具有易氧化等特点,与非金属材料沉积成形有很大差异,所以目前研究都停留在成形一些简单形状零件。西安科技大学、西安交通大学以及西北工业大学等近年来也对金属熔滴沉积成形技术

展开了理论与试验研究,如金属液流断续特性、金属熔滴沉积变形^[7-10]机理和均匀金属熔滴的控制与监测方法等,并针对电力器材典型结构成形出实体金属制件。

1 单颗熔滴沉积成形过程分析

1.1 单颗金属熔滴成形形态演变过程

利用 VOF 方法建立单个液滴与基板发生碰撞沉积变形的模型,依据金属熔滴沉积过程中的形貌变化,将整个沉积过程划分为 3 个阶段:运动、沉积铺展和平衡阶段^[4]。

1) 运动阶段

运动阶段由于金属熔体表面张力和粘性的作用,金属熔滴与基板接触铺展之前仍能保持圆球形状,金属熔滴直径为 D ,如图 1a 所示。

2) 沉积铺展阶段

金属熔滴与基板接触后发生变形,此时熔滴铺展直径变大,高度变小,如图 1b 所示。由能量守恒可以推导出铺展直径 D_1 和 D 之间的关系:

$$D_1 = D \sqrt{\frac{(We+12)}{3(1-\cos\theta) + 4\left(\frac{We}{\sqrt{Re}}\right)}} \quad (1)$$

其中, We 为韦伯数, Re 为雷诺数。

收稿日期: 2018-02-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (2015AA042503-02); 国家自然科学基金 (51605379)

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

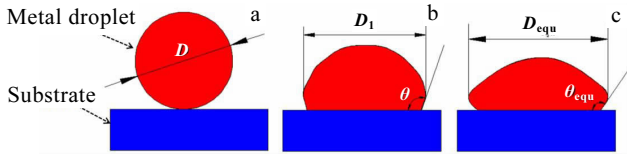


图 1 金属熔滴变形示意图

Fig.1 Metal droplet deformation: (a) movement stage, (b) deposition stage, and (c) balance stage

$$We = \frac{\rho DV^2}{\sigma} \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho DV}{\mu} \quad (3)$$

式中, D 为金属熔滴直径, σ 为表面张力, θ 为接触角, ρ 为液滴密度, V 为液滴速度, μ 为粘度系数。

3) 平衡阶段

金属熔滴在沉积铺展过程中逐渐凝固, 由能量最低原理知: 金属熔滴将趋于平衡。耗散作用使金属熔滴的动能和势能变为零。若调节液流沉积参数且金属熔滴是基板材料的可湿性液体, 金属熔滴会完全浸润; 若基板表面粗糙且通过调节熔体温度、沉积速度、沉积距离等参数, 可以形成不完全浸润, 即得到如图 1c 所示的形状, 此时为平衡态, 铺展直径为 D_{equ} , 可由下式求得:

$$D_{equ} = D \left[\frac{4 \sin \theta_{equ}}{\tan^2 \left(\frac{\theta_{equ}}{2} \right) (2 + \cos \theta_{equ})} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

式中: θ_{equ} 为平衡态时接触角。

1.2 单颗金属熔滴沉积成形实验验证

金属熔滴液流沉积成形过程是一个受多因素综合影响且涉及金属流动、传热和凝固等多场耦合的复杂过程。由于工艺参数较多, 要实现熔滴的重熔搭接、扫描沉积步距、三维零件成形致密度、尺寸精度及内部质量等的有效控制, 难度较大。

本研究中, 熔滴材料为锡铅合金 (Sn63~37), 熔体温度 $T_d=496$ K, 脉冲压力 $P=0.3$ MPa, 脉冲频率 $f=30$ Hz, 喷嘴直径为 $D_0=0.6$ mm, 沉积基板为锡板, 基板温度 $T=400$ K。

利用 Fluent 软件中的 VOF 模型进行数值模拟, 对每个时间步内所有单元的各流体组分所占有的体积率进行求解, 跟踪每个时间步熔滴的自由表面, 从而掌握金属熔滴每一时刻的形态变化。在进行数值模拟时,

由于液体与空气的密度和粘性相差很大, 忽略空气影响把金属熔滴的表面当作自由表面^[10]。

数值模拟考虑了流场以及表面张力等因素, 金属液滴仍能保持刚开始的所示的球面性质。实验结果为采用高速 CCD 照相机对金属熔滴与基板碰撞变形实时拍照不同时刻的形态图^[9]。由于拍摄速率的限制, 照片不能捕捉到运动阶段以及各个变形阶段临界时刻的精确形态, 但仍可以清楚地反映熔滴铺展直径的变形趋势。

图 2 是在金属熔滴与基板碰撞后, 在不同时刻扫描电镜照片和仿真结果比较。图 2a₁ 为在 0 s 时第 1 颗金属熔体温度以及铺展形貌仿真; 图 2a₂ 为在 0 s 时第 1 颗金属熔体温度以及铺展形貌 SEM 照片; 图 2b₁ 为在 0.030 07 s 时第 1 颗金属熔体温度以及铺展形貌仿真; 图 2b₂ 为在 0.030 07 s 时第 1 颗金属熔体温度以及铺展形貌 SEM 照片; 图 2c₁ 为在 0.060 02 s 时第 1 颗金属熔体温度以及铺展形貌仿真; 图 2c₂ 为在 0.060 02 s 时第 1 颗金属熔体温度以及铺展形貌 SEM 照片。由图可以看出, 当金属熔滴与基板接触之前, 其温度为 496 K, 且均匀分布, 如图 2 所示。由于基板温度相对于金属熔滴而言, 温度很低, 与基板接触部分, 熔体温度降低最快, 熔滴顶部温度下降较慢。随着熔滴在基板上进行铺展, 温度逐渐降低, 直至金属熔滴全部凝固。

2 三维零件成形工艺研究

为了实现成形轨迹间的可靠连接, 需要使相邻两条成形轨迹之间有一定的相互搭接部分。搭接过程中的成形条件, 都会造成热影响区的变化, 从而进一步影响到搭接质量。因此, 对搭接成形的机理进行研究, 获得合适的搭接工艺参数是确保成形质量的关键问题。

2.1 三维零件搭接模型及搭接率计算

三维零件的搭接需要同时考虑纵向搭接和横向搭接。假定单颗金属熔滴沉积后其成形的最大宽度为 S_d , 在金属熔滴逐点沉积的过程中, 相邻两个沉积熔滴之间的扫描步距 S 要与 S_d 满足一定的条件才能保证熔滴之间出现搭接现象。当 $S < S_d$ 时, 沉积的熔滴之间会出现搭接现象, 相邻的熔滴之间结合成一条连续的金属线条; 当 $S > S_d$ 时, 沉积的熔滴之间由于相互独立不会出现搭接结合现象。结合图 3 铺展参数, 在零件成形过程中, 单颗熔滴在未沉积到基板前可以认为是直径为 D 的均匀圆球体, 沉积后的形态是一个近似的球缺形体, 则由质量守恒定律可知: 单颗球体熔滴的体积与熔滴沉积后的球缺体积相等。得到金属熔滴沉积搭

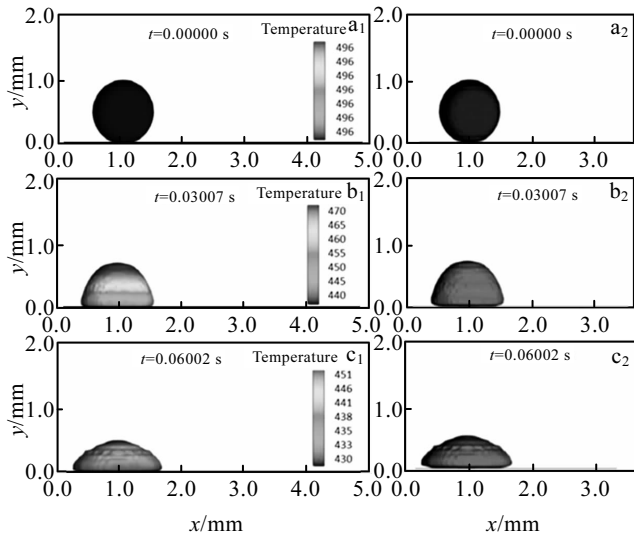


图 2 仿真结果与实验对比图

Fig.2 Comparison between simulation (a₁~c₁) and experimental (a₂~c₂) results

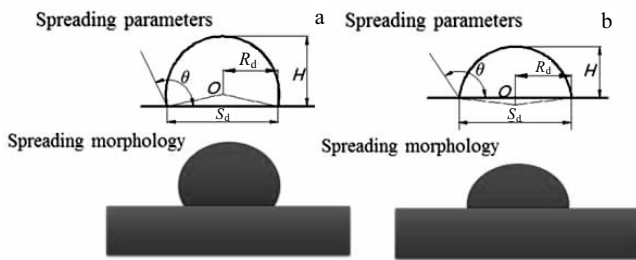


图 3 不同接触角下熔滴铺展参数和形貌示意图

Fig.3 Parameters and morphologies of the droplets at different contact angles: (a) $\theta > 90^\circ$ and (b) $\theta < 90^\circ$

接的条件, 可以用下面的公式来表示:

当 $\theta > 90^\circ$

$$S \leq S_d = 2R_d = D \left(\frac{4(\sin \theta)^3}{(1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

当 $\theta < 90^\circ$

$$S \leq S_d = 2R_d = D \left(\frac{4}{(1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

依据上面的计算公式, 可将 $S=S_d$ 作为金属熔滴沉积搭接的临界条件。图 4 给出了在不同熔滴直径和接触角下的熔滴搭接状态区域划分。图中的曲线分别是随着接触角 θ 变化, 不同熔滴直径 (0.3, 0.5, 1.0 和 1.5 mm) 下的沉积搭接临界条件 ($S=S_d$)。在金属熔滴沉积过程中, 当熔滴直径 D 和熔滴沉积后的接触角 θ

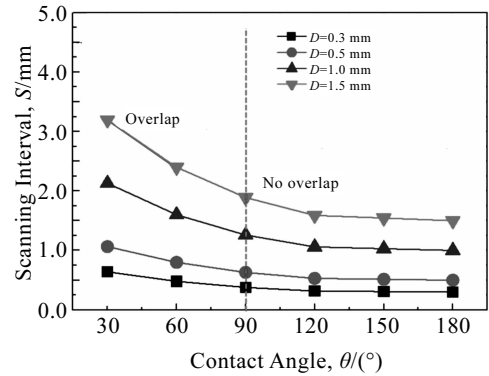


图 4 不同熔滴直径和接触角下的熔滴临界搭接条件

Fig.4 Critical lap conditions of the fusion drops with different droplet diameters and contact angles

保持不变时, 如果选定的扫描步距 S 的数值位于计算的临界搭接曲线的上方 ($S > S_d$), 则沉积的熔滴之间将不会出现搭接结合现象; 反之, 如果选定的扫描步距 S 的数值位于计算的临界搭接曲线的下方 ($S < S_d$), 则沉积的熔滴之间将会出现搭接结合现象。

在单颗熔滴进行单道横向沉积线条的过程中, 当沉积的熔滴之间获得如图 5 中所示的理想搭接状态时, 本文定义此时选取的扫描步距 S_{XP} 为最优扫描步距。得到如下关系:

$$\frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2} \right)^3 = \left[\theta \left(\frac{D}{2} \right)^2 + \frac{S}{2} \cdot \frac{D}{2} \sin \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) \right] \cdot S_{XP} \quad (7)$$

得到最优扫描步距 S_{XP} 为:

$$S_{XP} = \frac{2\pi D}{3 \left[\frac{4}{(1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta)} \right]^{\frac{2}{3}} (\theta - \sin \theta \cos \theta)} \quad (8)$$

可以看出, 最优扫描步距 S_{XP} 只与熔滴直径 D 和接触角 θ 有关。在相同的接触角 θ 下, 最优扫描步距 S_{XP} 与熔滴直径 D 之间是一种线性递增的关系; 而在相同的熔滴直径 D 下, 最优扫描步距 S_{XP} 与接触角 θ 之间是一种非线性递增关系。

成形单道零件是在 z 方向依次进行分层截面累加的过程。除第 1 层在基板上成形外, 后续各层均在前一分层截面上进行。在金属熔滴沉积零件过程中, 设定金属熔滴在逐点扫描沉积层面时按照图 5b 中所示的路径方式扫描沉积 (栅格扫描)。考虑层面沉积过程的实际情况, 定义相邻两个沉积熔滴中心间的距离为扫描步距 S , 其中, 沿 x 方向的扫描步距为 S_x 和沿 y 方向的层厚为 S_y , 如图 5c、5d 所示。其中: J_x 、 J_y 分别表示在坐标系 x 、 y 轴方向上熔滴间搭接部分的最大

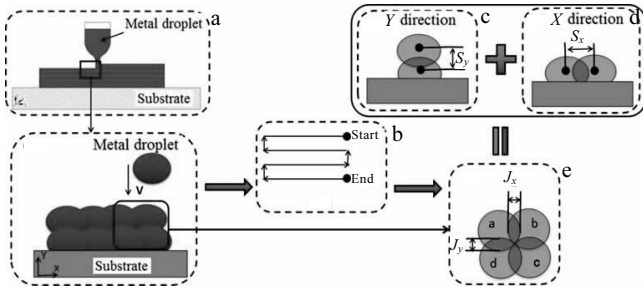


图 5 多层搭接成形过程示意图

Fig.5 Multi-layered process diagram

宽度。依据整个零件的成形过程原理可知，熔滴在 x 方向上逐点沉积线条时， S_x 将影响线条的成形质量；熔滴在 y 方向上逐线沉积层面时， S_y 将影响层面的成形质量。如果两者选取的不合适，将会使成形零件内部出现孔洞缺陷，使熔滴间的结合强度降低。

选取 S_y 为最优层厚，根据 y 方向上的搭接可以得到最优层厚 $S_{y,p}$ 为：

$$S_{y,p} = \frac{D \left[\frac{4}{(1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta)} \right]^{\frac{1}{3}} (\theta - \sin \theta \cos \theta)}{2(1 - \cos \theta)} \quad (9)$$

当层厚 S_y 太大时，容易出现孔隙，并且影响制件的成形质量。

2.2 前层表面平整度对后续层表面平整度的影响

由于搭接表面是一个具有周期性的波峰、波谷形式的表面，在搭接表面上进行堆积时的情况与在基板平面上堆积的情况有所不同。

通过在平整度不同的表面上进行平面堆积实验，来进一步分析搭接表面质量对后续层成形质量的影响，如图 6a 所示。

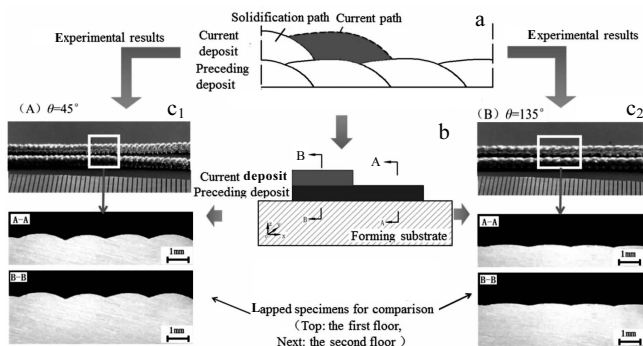


图 6 搭接成形实验

Fig.6 Shape experiment: (a) multiple layers of metal were fused together, (b) schematic diagram of sample, and (c) cross section of two-layer

1) 成形实验

在两种不同平整度的表面上进行成形实验。实验过程如下：

(1) 分别用 $\theta=45^\circ$ 和 $\theta=135^\circ$ 的成形形貌在基板上成形矩形扫描截面，成形形貌长度为 40 mm；

(2) 工作台下降一个层高，在搭接表面上用相同工艺参数、搭接中心距进行第 2 层的成形，图 6b 为试样剖面的示意图；

(3) 按照图中 A-A 和 B-B 两截面处用线切割切取一层和两层搭接的试样，经砂纸打磨后用显微镜观察。

2) 实验结果分析

在自行研制的金属熔滴沉积实验平台上进行沉积。实验中选用 63%Sn-37%Pb 合金为沉积材料，基板为不锈钢板，其他相关工艺参数如表 1 所示。

图 6c 所示为在 2 种不同平整度的表面上进行成形后的截面照片。对 5 个波谷处的 H_d 值进行了测量，结果如表 2 所示，绘制曲线如图 7 所示。

图 7 中从 $\theta=45^\circ$ 试样及曲线可见：试样在第 1 层搭接后的表面平整度较差，搭接表面波峰、波谷间的起伏较大。在进行第 2 层的成形时，成形熔滴在经过波峰和波谷时形态变化，直接影响了金属沉积的稳定性，从而导致成形形貌的高低不平。在其他的成形实验中还反映出，较深的波谷会对熔滴过渡的稳定性造成影响。例如在第 2 层成形时，当前成形形貌恰好处于前一层搭接表面的波谷上方。这些都会影响成形形貌的表面质量，降低成形件的表面精度、力学性能等。

从 $\theta=135^\circ$ 试样及曲线可见：第 1 层完成后的平整度较高，波峰与波谷间的起伏较小，而且高度分布均匀。因此在进行第 2 层的成形过程中，金属熔滴在波峰和波谷间过渡时形态的变化量较小，加之金属液滴沉积稳定性都非常好，使金属熔滴间可以实现充分搭接。测

表 1 三维零件沉积实验相关工艺参数

Table 1 Process parameters of 3D component deposition	
Parameter	Value
Pulse pressure, P/MPa	0.4
Pulse frequency, f/Hz	40
Substrate temperature, T/K	400
Nozzle diameter, D_0/mm	0.7
Distance between substrate and nozzle, h_s/mm	5
Melt temperature, T_d/K	550
	1.17
	1.61
	2.22
	2.51
Environmental oxygen volume fraction/%	0.002
Height of part, H/mm	20

表 2 不同表面平整度多层搭接对比

Table 2 Comparison of multi-layered lap with different surfaces flatness

Number	$\theta=45^\circ$		$\theta=135^\circ$	
	First floor	Second floor	First floor	Second floor
	H_d/mm	H_d/mm	H_d/mm	H_d/mm
1	0.15	0.18	0.05	0.09
2	0.18	0.19	0.04	0.08
3	0.20	0.23	0.03	0.07
4	0.16	0.18	0.04	0.08
5	0.17	0.23	0.04	0.08
Mean value	0.172	0.202	0.04	0.08

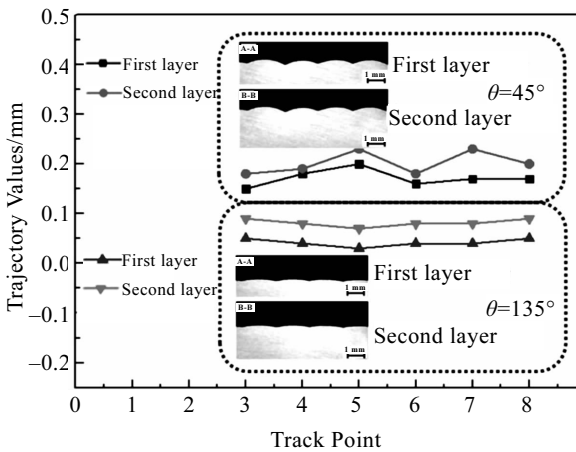


图 7 多层搭接时成形轨迹 H_d 变化曲线
Fig.7 H_d curves of multi-layered process

量结果也显示了第 2 层搭接表面的平整度和第 1 层的相当，波峰和波谷之间的距离明显减小，制件的表面质量有很大提高。

实验结果说明，分层截面的平整度会影响后续分层截面的表面平整度。若前层的表面平整度高，则后续层的表面平整度也相应较高，反之，若前层的表面平整度较低，则后续层的表面平整度相应的也较差。

2.3 扫描沉积步距对成形质量影响

为了检验沉积厚度计算模型的正确性与可行性，通过一个圆管薄壁件的沉积实验来给予验证。实验中选用 63%Sn-37%Pb 合金为沉积材料，基板为不锈钢板，其他相关工艺参数如表 1 所示。图 8 为零件在不同层厚 S_y 下的沉积实验结果，其中图 8a 为设计的零件三维模型，按照图 8b 所示的方式分层扫描。具体沉积形状以及对零件微观组织如图 8c 所示。

由实验结果可以看出，当层厚 $S_y=2.22$ mm 时得到的沉积结果与最初设计的零件模型尺寸误差最小，为 4.98%，如图 9 所示，并且制件内部质量最优。在分层相同的情况下，层厚 $S_y=1.17$ mm 和层厚 $S_y=1.61$

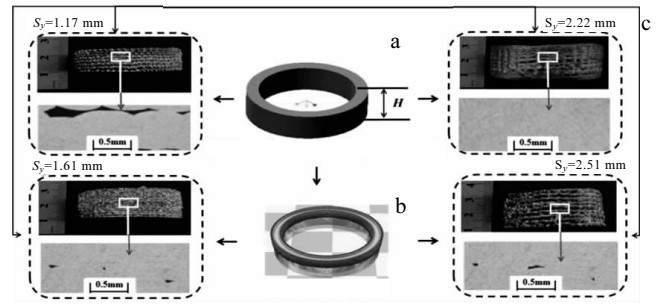


图 8 三维零件在不同沉积厚度下的沉积结果

Fig.8 Results of the deposition experiment of 3D parts under different sedimentary thicknesses: (a) three-dimensional component model, (b) parts are layered, and (c) forming parts and local micro topography

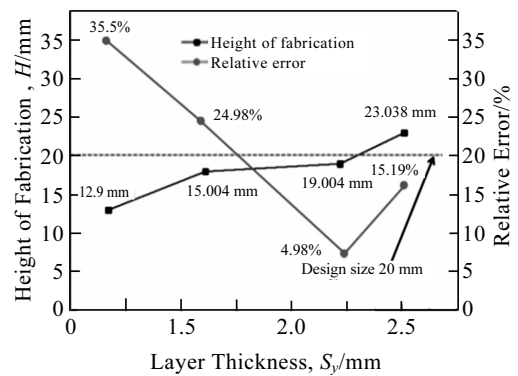


图 9 层厚与成形制件高度和相对误差关系曲线

Fig.9 Relation curves of thickness to height and relative error

mm 时得到的制件尺寸分别为 12.9 和 15.004 mm，都小于零件模型的设计尺寸（20 mm），制件内部存在搭接间隙；而层厚 $S_y=2.51$ mm 时得到的制件尺寸（23.038 mm）大于零件模型的设计尺寸，并且内部存在微孔等缺陷。通过对实验结果的对比分析可知：合理选择层厚 S_y 可实现零件在沉积方向上成形尺寸的有效控制。

3 结 论

在脉冲压力 $P=0.4$ MPa、脉冲频率 $f=40$ Hz、环境氧体积分数 $\leq 0.002\%$ 、熔体温度 $T_d=550$ K、基板温度 $T=400$ K、基板与喷嘴间距离 $h_s=5$ mm、喷嘴直径 $D_0=0.7$ mm 时，成形制件的层厚 $S_y=2.22$ mm，致密度较好，验证了计算模型的正确性与可行性。

参考文献 References

[1] Cheng S, Chandra S. *Experiments in Fluids*[J], 2003, 34: 755
[2] Stewart X C, Tiegang L, Chandra S. *Journal of Materials*

- Processing Technology*[J], 2005, 159: 295
- [3] Fang M, Chandra S, Park C B. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*[J], 2007, 129(2): 311
- [4] Cao W, Miyamoto Y. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2006, 173(2): 209
- [5] Liu Q B, Huang C Z, Orme M. *Journal of the International Institutions for Liquid Atomization and Spray Systems*[J], 2000, 10(6): 565
- [6] Liu Q, Orme M. *Journal of Materials Processing Technology* [J], 2001, 115(3): 271
- [7] Orme M, Smith R. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*[J], 2000, 122: 484
- [8] Li Suli, Wei Zhengying, Du Jun *et al. Journal of Appl Phys A* [J], 2015, 120: 35
- [9] Li Suli, Wei Zhengying, Du Jun *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2017, 46(4): 893
- [10] Wei Pei, Wei Zhengying, Li Suli *et al. Applied Surface Science*[J], 2014, 3: 538

Building 3D Parts Based on Metal Droplet Deposition Process

Li Suli^{1,2}, Liu Wei³, Yang Laixia¹, Gao Yang¹, Xu Chao¹, Zhang Wenming¹, Lu Bingheng²

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

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

(3. Shaanxi Institute of Technology, Xi'an 710300, China)

Abstract: Based on the research on single metal droplet deposition behavior, a numerical calculation model of three-dimensional part lap forming was established, and the flowing, spreading and solidification mechanism of molten metal droplets in small space and under large temperature gradient were explored. The typical cross section during lap forming was revealed, and the influence of the main characteristic factors of droplet deposition on the forming morphology and internal quality was influenced. The results show that when the pulse pressure $P=0.4$ MPa, the pulse frequency $f=40$ Hz, the melt temperature $T_d=550$ K, the substrate temperature $T=400$ K, the distance between substrate and nozzle $h_s=5$ mm, the nozzle diameter $D_0=0.7$ mm and the thickness of the forming part $S_y=2.22$ mm, there are no obvious holes inside, resulting in better density.

Key words: metal droplets; 3D parts; forming process; lap rate; flatness

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