

金属微液滴竖直堆积成形工艺

李素丽^{1,2}, 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, 西安, 710054; 2. 西安交通大学, 西安, 710049)

摘要: 通过对金属微液滴竖直堆积行为的研究, 探索不同成形工艺参数下, 金属微液滴竖直搭接堆积、铺展形貌的变化规律, 采用有限元模拟与试验验证相结合的方法, 揭示金属微液滴在较大的温度梯度及较小的成形空间下竖直搭接堆积成形过程中, 熔体喷射、堆积、搭接相互影响机制机理。结果表明, 在金属微液滴竖直堆积过程中, 熔体加热温度、基板与喷头的距离、扫描速度、扫描路径等工艺参数都会对成形零件的表面精度和内部质量产生很大影响, 因此其工艺的匹配性研究对于提高金属微液滴堆积成形的 3D 打印零件精度和质量有很大的理论和实际指导意义。

关键词: 金属微液滴; 竖直搭接; 成形工艺; 搭接率; 平整度

中图分类号: TG441.1

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20190524002

0 序言

3D 打印技术作为一种新兴的前沿技术, 不需要传统的刀具、夹具及多道工序, 利用三维设计数据在一台设备上可快速而精确地制造出任意复杂形状的零件, 从而实现“自由制造”, 解决许多过去难以制造和装配的复杂结构成形问题, 并大大减少了加工工序, 缩短了加工周期, 而且产品的结构越复杂, 其优势越明显^[1]。

金属微液滴堆积技术和现有的金属激光 3D 打印技术相比, 采用电磁感应作为热源, 具有原材料来源广, 无需考虑成形材料对激光的反射作用等, 而且成形过程中通过软件控制实现横向、纵向堆积成形, 因此具有设备成本较低, 成形效率比较高的优点, 目前该技术主要应用在金属零件增材制造或增减材复合制造中, 在微小金属试件制造中应用前景良好, 因此有很高的研究价值^[2]。

目前国内外许多高校及研究所都对金属微液滴沉积成形有一定的研究, 东北大学 (Northeastern University) 主要对微液滴成形过程进行数值分析^[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]; 天津大学的理学院^[5]开展了一些

微液滴成形的基础研究, 但目前仍停留在试验室阶段。

由于金属在加热过程中很容易氧化, 与非金属有很大的不同, 因此在成形过程中需要考虑多因素耦合效应, 这对于成形件有很大的影响, 也是文中亟需解决的问题^[6]。西安科技大学、西安交通大学、西北工业大学及大连理工大学等都对金属微液滴堆积成形技术进行了一定的理论和试验研究, 为文中的研究提供一定的参考^[7]。

1 金属微液滴堆积过程传热分析

金属微液滴堆积搭接成形过程受很多种因素综合影响, 成形过程是金属铺展、散热和搭接等多场耦合复杂过程, 由于影响参数较多, 要实现对微液滴的有效重熔搭接、三维零件的成形形貌及内部搭接质量等的有效控制, 难度较大。

在金属熔体冷却过程中, 一旦达到熔点温度, 金属熔体便开始释放相变潜热直至温度降到熔点之下。在多元组分体系中, 相变是存在温度范围的, 在这种情况下, 熔化潜热在温度改变的同时不断释放, 如公式 (1) 所示^[8]。相变期间固体组分 (F_S) 可以表示为温度的函数, 即

$$F_S(T) = \begin{cases} 0, & T \geq (T_m + \varepsilon) \\ \frac{T_m + \varepsilon - T}{2\varepsilon}, & (T_m + \varepsilon) > T \geq (T_m - \varepsilon) \\ 1, & T < (T_m - \varepsilon) \end{cases} \quad (1)$$

式中: T 为整个装置的温度; T_m 为金属熔体熔点温度均值; ε 为金属熔体熔点温度差值的一半. 因此, 固相和液相的温度为^[9]

$$T_s = T_m - \varepsilon \quad (2)$$

$$T_L = T_m + \varepsilon \quad (3)$$

装置总的热容 H 由两部分组成, 显热 h 和相变潜热 ΔH . 而显热可以通过以下方程计算^[10-11], 即

$$h = c_p \cdot T \quad (4)$$

式中: c_p 为比热容.

2 金属微液滴堆积成形原理

金属微液滴堆积成形过程如图 1 所示, 即金属丝材、块材、管材经过去杂质等处理后, 放入坩埚中, 利用电磁感应加热, 通过加压, 熔体从坩埚下面的喷嘴流出, 成形出所需零件的形状. 整个成形过程在氩气环境中进行, 成形堆积过程用 CCD 进行拍摄记录, 利用采集卡进行收集数据.

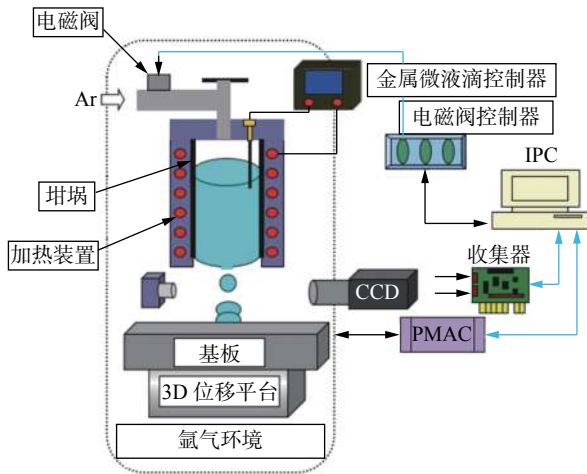


图 1 堆积成形原理

Fig. 1 Schematic diagram of metal droplet deposition

3 单道竖直搭接成形过程

3.1 单道竖直搭接模型

定义基板速度为零, 通过喷头喷出的金属微液滴在基板表面进行沉积, 即为单道竖直搭接模型. 具体如图 2 所示.

由图 3 可以看出, 金属微液滴在竖直搭接过程中, 在相同条件下, 微液滴的下降速度越大, 微液滴的铺展越大. 利用金属熔体堆积成形设备, 成形材料为 Sn40-Pb60, 在氩气环境中, 保证氧含量不大

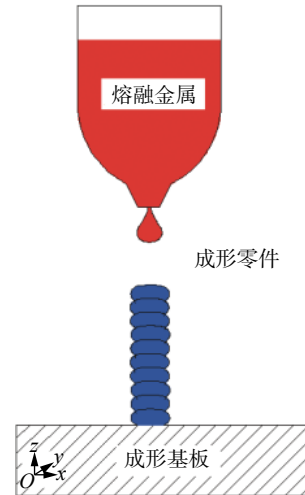


图 2 竖直堆积过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of vertical lap forming process

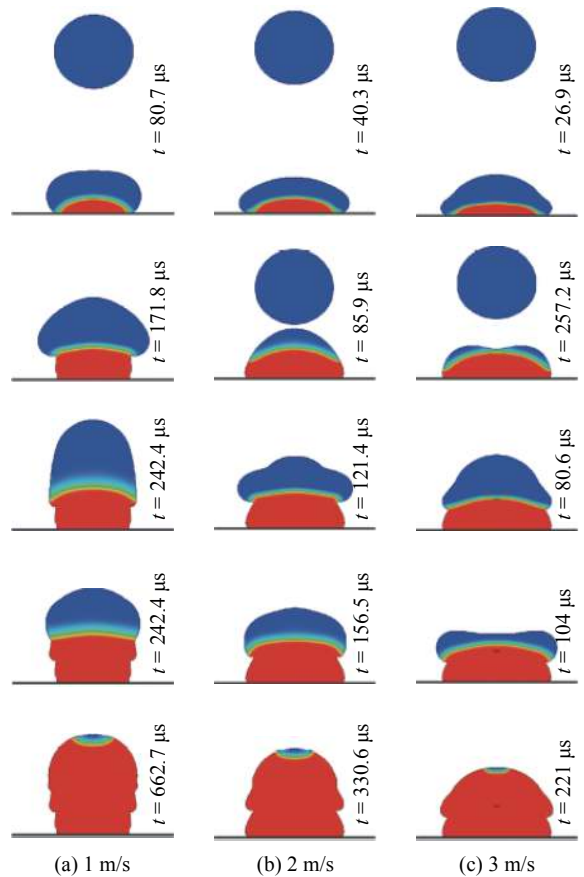


图 3 计算机分析

Fig. 3 Transient numerical simulation of droplet deposition spreading evolution. (a) 1 m/s; (b) 2 m/s; (c) 3 m/s

于 20 mg/L, 分别对不同金属熔体微液滴滴落速度下的竖直搭接堆积情况进行数值模拟和样件分析 (电镜观察), 如图 4 所示, 可见模拟结果和试验结果有很好的 consistency^[8].

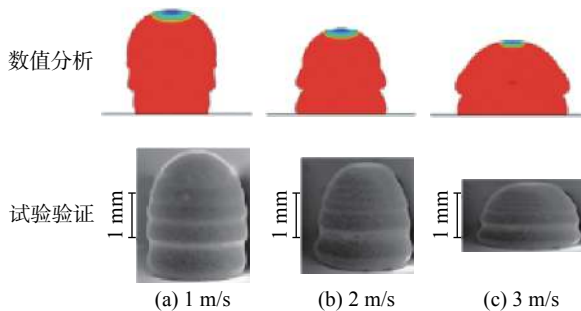


图 4 微液滴堆积过程计算机分析及验证

Fig. 4 Transient numerical simulation and experimental verification of droplet deposition spreading evolution. (a) 1 m/s; (b) 2 m/s; (c) 3 m/s

表 1 堆积试验相关工艺参数

Table 1 Process parameters of sedimentary experiment

熔体温度 T_d/K	基板温度 T/K	基板距离 h_s/mm	脉冲压力 p/MPa	脉冲频率/Hz
525, 550, 575	400	10	0.3	30

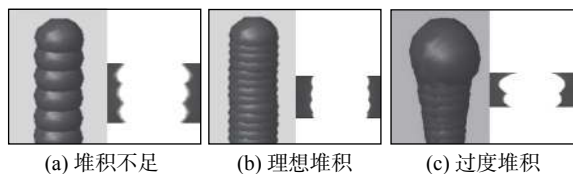


图 5 不同堆积形式

Fig. 5 Cross-section of three different lap spacing forming specimens. (a) insufficient accumulation; (b) ideal accumulation; (c) excessive accumulation

根据图 5 所示, 堆积不足时, 试件表面出现了波峰和波谷, 这是由于金属熔体在凝固时存在一定的表面张力而产生的收缩作用, 理想堆积时, 试件表面出现的波峰和波谷可以近似成一个平面, 过度堆积时, 样件表面出现拱起。

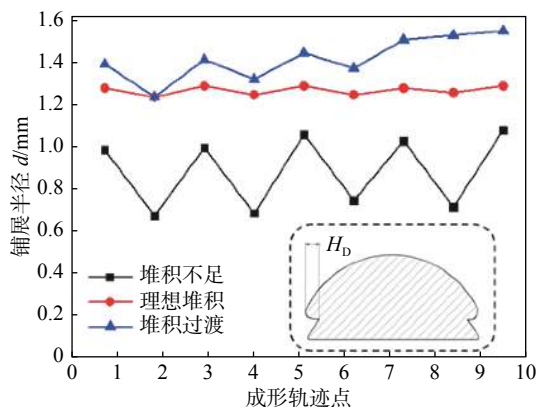
在垂直堆积过程中, 成形试件形貌近似一个具有波峰和波谷的理想平面。拟将金属微液滴最大铺展的半径和最小的铺展半径的差值设为 H_D 。分别对不同金属熔体温度 525, 550, 575 K 时成形试件的 H_D 进行数据测量, 为了更好地进行测量, 需要对其放大 20 倍, 并且在显微镜下进行观察, 即用 KEYENCE VH-8000 显微境放大 20 倍, 绘制如图 6 所示的曲线。

由图 6 可知, 当堆积不足时, H_D 的值最大, 试件形貌有明显的波峰和波谷, 在堆积理想时, 金属微液滴已经充分熔合并没有明显的波峰和波谷, 可以近似一个理想平面, 当堆积过度时, 试件形貌出现了上粗下细的现象, 这会对后续堆积产生很大影响。

3.2 成形截面对搭接形貌的影响

成形截面的粗糙度是衡量试件成形形貌的重要参数之一, 为此, 开展了金属微液滴竖直堆积成形工艺参数对成形试件粗糙度影响规律研究。

基于图 1 的成形原理, 在图 3, 图 4 中数值分析和试验结果指导下, 采用表 1 所示的工艺参数, 针对不同熔体温度进行了竖直堆积工艺试验。根据沉积材料的性质, 分别设金属熔体温度 525, 550, 575 K, 拟取长度 $L = 50$ mm 进行分析, 成形参数如表 1 所示, 图 5 为三种不同堆积形式下样件的截面形状 (左: 样件形貌, 右: 样件截面)。

图 6 H_D 关系示意图Fig. 6 H_D relationship curves

3.3 不同参数对金属堆积内部冶金结合影响

对于金属微液滴堆积单道竖直堆积而言, 当其它参数一定时, 金属熔体加热温度 T_d 较低, 喷头距离基板的距离 h_s 较小时, 金属微液滴铺展较小, 搭接堆积过程容易凝固, 反而金属熔体加热温度 T_d 较高, 喷头距离基板的距离 h_s 较大时, 金属微液滴在滴落时, 受到脉冲压力以及重力作用, 铺展变形大, 从而影响成形试件搭接的精度。此外金属微液滴竖直间良好重熔及冶金结合的必要条件是金属熔体温度 T_d 和距离基板的距离 h_s 等参数的合适匹配。

3.3.1 熔体加热温度 T_d 的影响

金属加热温度 T_d 是金属竖直搭接过程中最为重要的工艺参数之一, 直接影响金属微液滴堆积形

貌以及后面堆积铺展的行为. 成形参数如表 1 所示.

由图 7 可知, 当熔体加热温度 $T_d = 525$ K 时, 搭接试件表面有“鱼鳞状”的波纹. 从样件截面以及内部组织观察, 熔体垂直搭接部分处有搭接痕迹, 试样致密度较低; 而熔体加热温度 $T_d = 550$ K 时, 成形形貌的质量大大提高, “鱼鳞状”波纹基本消失

了, 金属微液滴垂直搭接部分完全没有搭接痕迹, 实现了金属熔体的冶金结合. 由此可知, 如果熔体加热温度 T_d 过低, 竖直搭接间隙以及间隙处的孔洞出现的几率将会大幅度提高, 当 $T_d = 575$ K 时, 成形过程中熔融金属极易发生拱起, 从而对试件形貌产生影响.

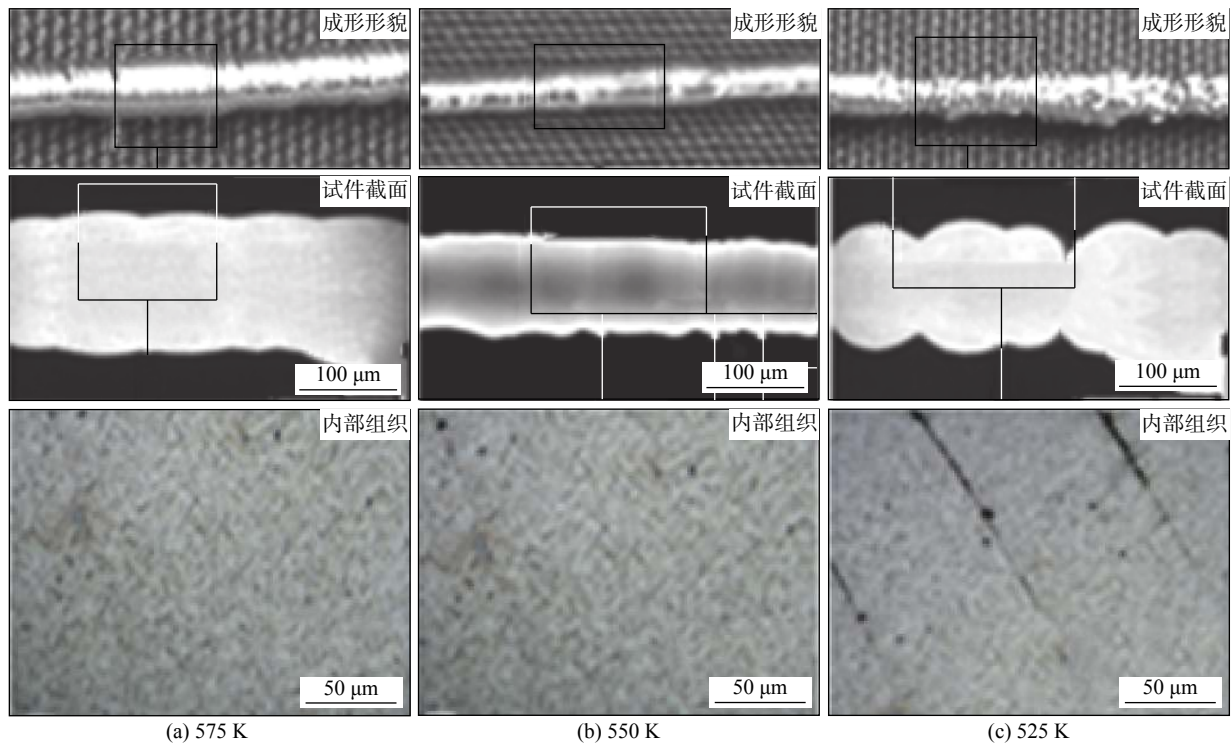


图 7 T_d 对多颗微液滴堆积影响示意图

Fig. 7 Influent of T_d . (1) 575 K; (2) 550 K; (3) 525 K

3.3.2 喷头与基板的距离 h_s 的影响

在表 2 所示的成形参数下, 通过图 8 可以看出, h_s 过大时 ($h_s = 25$ mm), 金属微液滴下降需要较长时间, 致使微液滴在到达基板之前温度已经大幅度降低, 降低到金属溶体的熔点之下, 金属微液滴还没有充分进行铺展, 因此试件内部冶金结合不好. 当 $h_s = 20$ mm 时, 金属微液滴下降需要较短时

间, 致使微液滴在到达基板之前温度没有大幅度降低, 金属微液滴还可以进行铺展, 因此试件内部冶金结合有所改善. 当 $h_s = 15$ mm 时, 金属微液滴下降需要更短时间, 致使微液滴在到达基板之前温度没有大幅度降低, 金属微液滴可以充分进行铺展, 因此试件的内部冶金结合更好. 可见 h_s 在保证不干涉零件成形情况下, 取值应该尽可能小.

表 2 h_s 试验参数

Table 2 Parameters h_s of the deposition experiment

熔体温度 T_d /K	基板温度 T /K	基板距离 h_s /mm	脉冲压力 p /MPa	脉冲频率 f /Hz
550	400	25, 20, 15	0.3	30

表 3 为不同工艺参数的组合, 在不同工艺试验中, 成形试件形貌如图 9 所示. 由图可见, 试件形貌依次降低, 最佳工艺参数为喷头与基板距离为 10 ~

20 mm, 熔体加热温度为 500 ~ 550 K, 通过三维成像系统对图 9 中 (c) 进行观察, 试件内部冶金结合很好, 没有出现微裂纹等现象, 如图 9 中 (f) 所示.

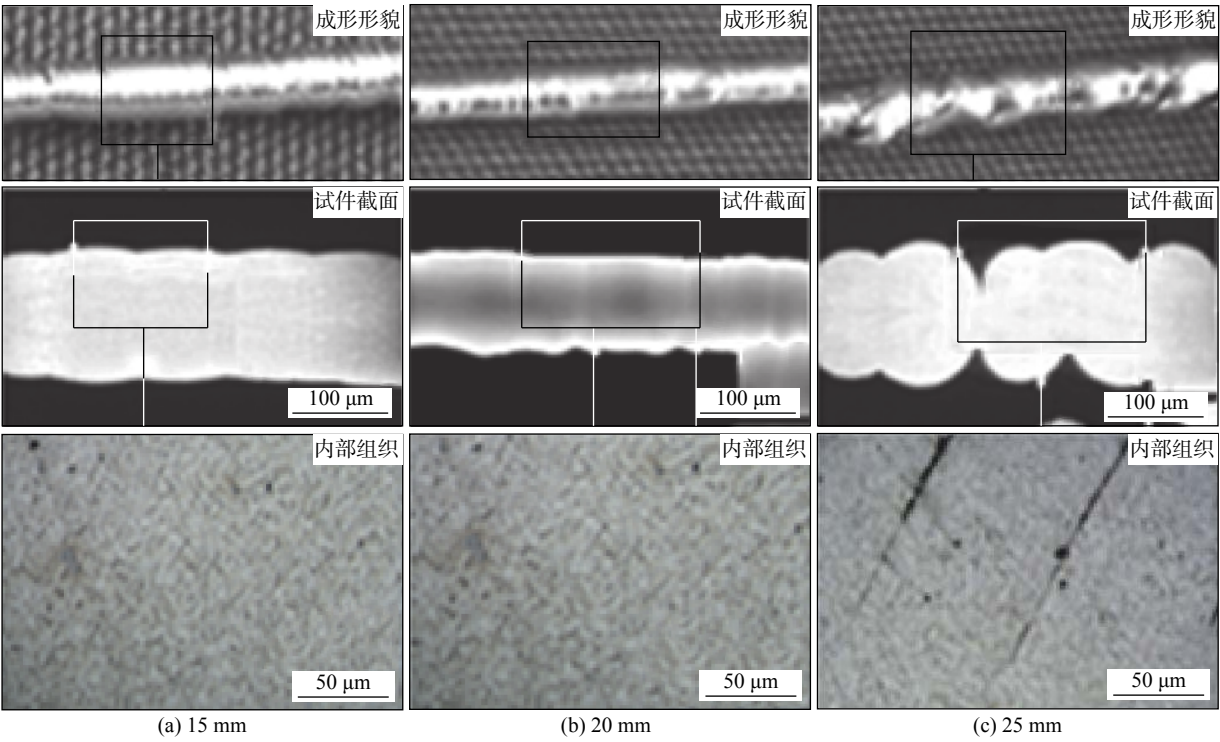


图 8 h_s 对多颗微液滴堆积影响示意图
Fig. 8 Influent of h_s . (a) 15 mm; (b) 20 mm; (c) 25 mm

表 3 不同参数组合试验
Table 3 Parameters of deposition experiment

序号	熔体温度 T_d/K	基板温度 T/K	基板距离 h_s/mm	脉冲压力 p/MPa	脉冲频率 f/Hz
(a)	550	400	10	0.3	30
(b)	520	400	15	0.3	30
(c)	500	400	20	0.3	30
(d)	480	400	22	0.3	30
(e)	475	400	25	0.3	30

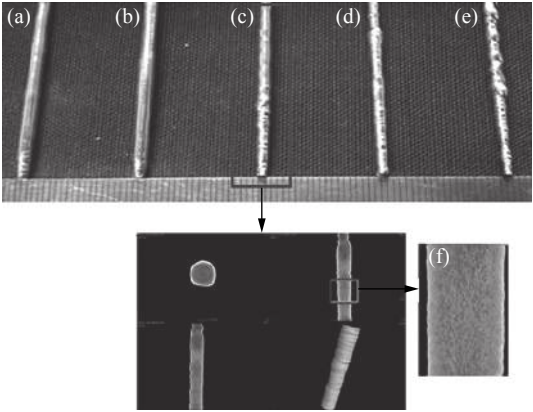


图 9 不同参数下堆积的试件
Fig. 9 Stacked samples with different parameters

4 结论

(1) 采用数值模拟和试验验证的方法对不同工艺参数下金属微液滴堆积成形进行分析研究, 可以看出影响成形试件形貌和内部冶金结合的因素很多, 主要有熔体温度和基板距离。

(2) 金属熔体的加热温度和喷嘴与基板之间的距离, 在其它参数不变的条件下, 即 $T = 400\text{ K}$, $D_0 = 0.6\text{ mm}$ 时, 取 $h_s = 10 \sim 20\text{ mm}$, $T_d = 550\text{ K}$, 金属微液滴有充分的铺展时间, 金属溶体可以充分熔合, 试件成形形貌较好, 内部冶金结合较为充分, 没有堆积痕迹。

参考文献

- [1] Li Suli, Wei Zhengying, Du Jun, *et al.* The fusion process of successive droplets impinging onto a substrate surface[J]. *Journal of Appl. Phys. A*, 2015, 120: 35 – 42.
- [2] 贾亚洲, 肖珺, 陈树君, 等. 2219 铝合金激光驱动 GMAW 熔滴过渡行为 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(3): 59 – 64.
Jia Yazhou, Xiao Jun, Chen Shujun, *et al.* laser driven GMAW droplet transition behavior of 2219 aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(3): 59 – 64.
- [3] 李素丽, 刘伟, 杨来侠, 等. 金属熔滴沉积成形三维零件的工艺研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(2): 626 – 631.
Li Suli, Liu Wei, Yang Laixia, *et al.* Research on the process of forming three-dimensional parts by metal droplet deposition[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48(2): 626 – 631.
- [4] 蒋小珊. 均匀金属液滴流的产生及其稳定喷射研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2010.
- [5] 汪应玲. TiNi 形状记忆合金与不锈钢瞬间液相扩散焊工艺及接头性能 [D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
- [6] Du Jun, Wei Zhengying, Chen Zhen, *et al.* Numerical investigation of pileup process in metal microdroplet deposition manufacture[J]. *Micromachines*, 2014, 31(2): 021601 – 1.
- [7] Li Z Y. Study on manufacturing tiny copper balls by using uniform droplet spray method [D]. Dissertation for Master Degree. Taipei: National Cheng Kung University, 2009.
- [8] 李素丽, 魏正英, 卢秉恒. 基于 ANSYS 的车身柔性件点焊装配应力分析 [J]. *焊接学报*, 2014, 35(11): 55 – 58.
Li Suli, Wei Zhengying, Lu Bingheng. Stress analysis of Spot welding assembly of body flexible parts based on ANSYS[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(11): 55 – 58.
- [9] 卢振洋, 李艳, 黄鹏飞, 等. 短路过渡气体保护焊参数优化 [J]. *焊接学报*, 2009, 30(3): 17 – 20.
Lu Zhenyang, Li Yan, Huang Pengfei, *et al.* Optimum parameters of short circuit droplet transfer gas metal arc welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(3): 17 – 20.
- [10] 马少俊, 吴学仁, 刘建中, 等. TC21 钛合金的微观组织对力学性能的影响 [J]. *航空材料学报*, 2006, 26(5): 22 – 25.
Ma Shaojun, Wu Xueren, Liu Jianzhong, *et al.* Influence of microstructures on mechanical properties for TC21 titanium alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006, 26(5): 22 – 25.
- [11] 祝力伟, 王新南, 朱知寿. 不同热处理工艺下 TC4-DT 钛合金的显微组织及力学性能 [J]. *钛工业进展*, 2011, 29(1): 9 – 12.
Zhu Liwei, Wang Xinnan, Zhu Zhishou. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of TC4-DT alloy[J]. *Titanium Industry Process*, 2011, 29(1): 9 – 12.

第一作者简介: 李素丽, 1981 年出生, 博士, 副教授; 主要从事 3D 打印方面的教学和研究工作; 发表论文 50 余篇; Email: 563456137@qq.com.

通信作者简介: 杨来侠, 博士, 教授, 博士研究生导师; Email: 867368760@qq.com.

(编辑: 郑红)