DOI: 10.3901/JME.2019.15.031

316L 不锈钢等离子增材制造工艺与尺寸预测模型研究^{*}

杨永强 翁昌威 周 权 宋长辉 陈 杰
(华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510600)

摘要: 以 316L 不锈钢粉末为成形材料, 通过单因素法研究工艺参数对单层单道焊道尺寸的影响, 结果表明送粉速度为 5~12 g/min, 堆覆速度为 300~600 mm/min, 堆覆电流在 30~50 A 为成型质量较好的工艺窗口。通过设计二次通用旋转组合试验, 建立一个基于二次回归方程的直臂体尺寸预测模型, 输入层为成型工艺中的堆覆电流、堆覆速度、送粉速度, 输出层为的宽度和层高。模型得到各参数影响尺寸显著度较高的回归方程, 并表明对宽度的影响程度顺序为: 堆覆电流>送粉速度>堆覆速度, 对层高的影响顺序为: 送粉速度>堆覆电流>堆覆速度。采用两组直臂体试验验证模型的准确性并进行力学性能测试, 试验结果与预测值的误差均在 5% 以内, 表明模型预测效果较好。并进行力学性能分析, 样件拉伸强度达到了 560 MPa 以上较铸造件的 480 MPa 有明显提高。

关键词: 等离子; 增材制造; 工艺; 二次通用旋转组合; 尺寸预测模型

中图分类号: TG456

Research on the Process and Prediction Model for Size of 316L Stainless Steel Fabricated by Plasma Arc Additive Manufacturing

YANG Yongqiang WENG Changwei ZHOU Quan SONG Changhui CHEN Jie

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510600)

Abstract: The influence of process parameters of plasma arc additive manufacturing on the size of single layer single pass bead is studied by single factor method with 316L stainless steel powder. The results show that a good process window with the powder feeding speed about 5-12 g/min, welding speed about 300-600 mm/min, and the current about 30-50 A. A quadratic general rotary combination test is taken to establish a prediction model of straight arm size based on quadratic regression equation with current, welding speed, powder feeding speed as input and the width and height as output. The influence on the width of straight arm body is: current > powder feeding speed > welding speed, and the order of influence on layer height is: powder feeding speed > current > welding speed. Two groups of straight arm tests are used to verify the accuracy of the model. The errors between the experimental results and the predicted values are less than 5%, which showed that the model had a good prediction effect. And the mechanical properties analysis is found that the tensile strength about 560 MPa or more is higher than the casting part.

Key words: plasma arc; additive manufacturing; process; quadratic general spinning design; dimension prediction model

0 前言

增材制造(3D 打印)在工业生产过程中掀起了极大的浪潮。相比于等材制造(制造过程中 $\Delta M=0$)、减材制造($\Delta M<0$)^[1], 增材制造技术的工业应用使得生

产和经济产生了根本性的变化。3D 打印有着各种各样的不同技术, 但其原理大致相同, 都是通过材料逐层堆积而形成零件^[2-3]。人们可以利用它制造任意复杂形状的产品, 而几乎没有生产浪费。

金属 3D 打印技术, 其大致可分为两种: ① 粉末床增材制造; ② 堆焊成形。粉末床增材制造主要有激光选区熔化(Selective laser melting, SLM)、电子束成型(Electron beam melting, EBM)等^[4-5], 该技术虽然能成形精度高的零件, 但是其效率较低、成形尺寸受限制。堆焊成形主要有: 等离子增材制造、

^{*} 国家自然科学基金(51875215)、广州市重大专项(201505051453257, 201704020118, 2018B090905001)、广东省科技厅(2015B090921002, 2017A030313271)和领域基金(61409230301)资助项目。20190228 收到初稿, 20190504 收到修改稿

激光近净成形(Laser engineered net shaping, LENS)、电子束送丝成形、电弧增材制造^[6-8]。本文主要研究基于同轴送粉的等离子增材制造技术,其利用等离子束作为热源,相较于电弧作为热源,等离子束能量更加集中,成型精度好、能成形较大零件,成型速率高,适合大型机构件的直接成形和现场修复。

国内西安交通大学、华中科技大学、南昌大学、天津大学、哈尔滨工业大学等高校科研院所的许多学者对等离子增材制造技术进行研究,但目前均处于试验规律性描述、控形控性工艺研究阶段。

天津大学杜乃成^[9]建立机器人电弧增材制造系统,利用红外线测温传感监控系统对电弧成形过程进行温度检测研究。提出熔滴过渡形式、热输入以及工作初始温度对金属成形的影响规律。

西安交通大学胡晓冬等^[10]提出了基于等离子弧焊直接金属成型的新方法,研究了成形工艺,确定堆覆电流、成型速度和成形焊道宽度的对应关系。提出了切向送丝解决成形轮廓表面质量问题。同年,华中科技大学张海鸥等^[11]提出将等离子增材制造技术与铣削减材结合,形成数控增减材设备,进行了工艺验证,成形了增减材零件。

查阅现有文献,发现国内外电弧增材制造技术所采用的电弧主要是钨极氩弧焊和融化极气保焊。对等离子研究相对较少,应用等离子为热源进行增材制造相比于其他电弧有很多处。等离子弧与传统电弧的主要区别是等离子弧柱相对集中,沉积层宽度相对较小,在集中区域温度特别高,其成形的零件加热极少。此外,使用等离子弧容易建立起间接电弧,与电弧技术中的直接电弧相比,提供了更小的热影响区。在增材制造过程中,等离子焊接技术可以降低基板上的传热,减少内应力和变形,降低电能消耗。

本文将对等离子增材制造的单层单道和单道多层直臂体进行研究,得到其单层单道焊道尺寸变化规律,以及建立单道多层直臂体的尺寸预测模型,并进行试验的验证,且对等离子增材制造样件进行力学性能测试,推动等离子增材制造技术的发展,促进其在实际工程问题上面的应用。

1 单层焊道工艺试验

1.1 焊道尺寸影响因素

与粉末床的金属增材制造方式不同,等离子增材制造成型速度快、效率高,但是尺寸形貌不易准确判断,影响因素复杂。研究发现基于等离子弧为热源的增材制造成形单层焊道的尺寸形貌影响因素

很多^[12-14],例如:堆覆速度(V_{welding})、送粉速度(V_{powder})、堆覆电流(I)、喷嘴直径、钨针内缩量、喷嘴到基板的距离、钨针尖端角度、粉末的材料、粉末的粒径、基板材料、基板初始温度、保护气流量、离子气流量、钨极直径等。根据前人的研究基础^[15-16],得出结论:影响等离子弧单道尺寸形貌的最重要的因素是堆覆速度、送粉速度、堆覆电流。

1.2 试验方法

为了简化研究内容,选取堆覆速度、送粉速度、堆覆电流,三个主要因素作为尺寸影响规律的工艺研究窗口,在探索尺寸规律时,采取单因素的研究方法,其他参数固定不变。

本试验选用广州雷佳公司等离子增减材设备 Laseradd-PR-500,其利用 ABB 六轴机器人结合两轴变位机,为加工提供更大的运动自由度;热源选用 ADMIRAL 350 等离子焊机;熔覆头采用三力易胜公司的同轴送粉等离子熔覆头;基板材料为 316L 不锈钢板,其尺寸大小为 200 mm×300 mm×10 mm;保护气为高纯度氩气;粉末的材料为 316L 不锈钢,焊道长度为 60 mm。图 1 是 316L 不锈钢粉末通过扫描电镜观察到的微观形貌图。表 1 为本文是使用 316L 不锈钢粉末的化学成分。

表 1 316L 不锈钢粉末的化学成分(质量分数%)

元素	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	O	P	C	Fe
316L	17.30	12.23	2.17	1.04	0.084	0.079	0.014	0.013	其他

图 1 316L 不锈钢粉末微观形貌

图 2 Laseradd-PR-500 设备主体

为保证能正常研究单层焊道宏观尺寸变化规

律, 分成两步: ① 确定成形稳定形貌焊道的成形工艺窗口, 先设置 24 组工艺参数探索堆覆电流、堆覆速度、送粉速度的工艺窗口。其中前 12 组为送粉速度为 12 g/min 不变, 堆覆电流分别设置 30 A、40 A、50 A 三个梯度, 堆覆速度共设置 300 mm/min、400 mm/min、500 mm/min、600 mm/min 四个梯度, 进行全因素试验。后 12 组试验设置堆覆速度控制在 400 mm/min 不变, 电流分别设置为 30 A、40 A、50 A, 送粉速度设置在 2 g/min、5 g/min、8 g/min、12 g/min, 进行全因素试验; ② 在工艺窗口内利用单因素法研究焊接工艺参数对单道尺寸的影响规律。

1.3 单层焊道工艺窗口结果分析

单层焊道试验结果如图 3 所示, 发现较差质量的焊道主要有两种形式: 焊道不连续(球化、断续)、焊道过于宽大。

通过图 3 的研究发现, 焊道的成形质量和电流堆覆速度的呈负相关。因此引入线能量密度 ψ 说明问题, 其定义为堆覆电流 I 、电压 U 的乘积除以堆覆速度 V , 具体表述为

$$\psi = \frac{UI}{V} \quad (1)$$

图3 单层焊道堆覆电流堆覆速度工艺窗口

当线能量密度较小时, 单位时间内粉末和基板接收到的能量相对较少, 融化的粉末接触到基板就直接凝固, 形成类似于驼峰的形状, 未能形成稳定的焊道, 如图3中的C、D所示; 当线能量密度较高时, 单位时间粉末和基板接收到的能量相对较多, 熔融的粉末温度较高, 能够在较高温度的基板上“流淌”较久才冷却, 所以会形成较宽的熔道, 如图2中的A所示。仅仅当线能量密度在合理的范围内, 才能形成宽高比合适的熔道, 如图2中的B所示。

通过图3发现, 送粉速度较少时, 单位时间内粉末供应不足, 导致成形的焊道出现断续现象, 如上图3中的E所示; 当送粉速度较多时, 单位时间供应的粉末较多, 较小的电流难以融化过多的粉末,

导致整个成形过程粉末飞溅严重, 这也是不利于成形的如上图3中的G所示。仅仅当送粉速度、送粉电流达到一个平衡后才能形成一个相对较好的焊道, 如上图3中的F所示。

因此, 单层焊道成形较好的焊道需要堆覆电流、堆覆速度、送粉速度三个工艺参数之间的平衡, 根据上述的研究, 大致可以圈定一个成形较好焊道的成形范围, 如表2所示。该参数可以接下来研究单因素对成形尺寸提供试验设计的工艺窗口。

图4 单层焊道堆覆电流送粉速度工艺窗口

表2 单层焊道成形质量较好工艺参数的范围

参数	堆覆电流 I/A	堆覆速度 $V_{\text{welding}}/(mm/min)$	送粉速度 $V_{\text{powder}}/(g/min)$
优化范围	30~50	300~600	5~12

在保证精度的情况下, 采用抛物线进行搭接模型的建立。

1.4 工艺参数对单道尺寸的影响规律

(1) 堆覆电流对单道尺寸的影响规律。

为探索堆覆电流对单层焊道的宽度和高度影响规律, 根据前面研究的合理成形较好焊道的工艺参数窗口。设计以下试验方案: 固定送粉速度为 11 g/min, 堆覆速度为 300 mm/min, 堆覆电流在 30~50 A 范围, 以 5 A 为梯度, 共进行 5 组工艺参数试验。图5显示了不同堆覆电流下的单层焊道高度和宽度的变化, 当电流从 30~50 A, 变化时单层焊道宽度从 3.73 mm 到 4.91 mm 不断上升, 高度从 2.83 mm 不断下降到 2.49 mm。

图5 单层焊道成形尺寸与电流关系

结果显示, 当堆覆电流变大时, 焊道的层宽也

相应的变宽。其主要的原因是堆覆电流变大后,单位时间内粉末和基板接收到的能量变大,弧柱的面积越大,焊道的热作用区域变大,熔融后的粉末以熔池形式在基板上的时间变长,在重力作用下,熔池更宽。而在同一成形条件下熔融的粉末是固定的,当焊道变宽时,其相应的成形高度自然变小。

(2) 堆覆速度对单道尺寸的影响规律。

固定送粉速度为 11 g/min,堆覆电流为 45 A,堆覆速度 300 mm/min、400 mm/min、500 mm/min、600 mm/min 四个梯度共四组试验。图 6 显示了不同堆覆速度情况下的单层焊道高度和宽度。当堆覆速度从 300 mm/min 变化至 600 mm/min 时,焊道的宽度由 4.30 mm 降至 3.54 mm,焊道高度 3.00 mm 降至 1.75 mm。

图 6 单层焊道成形尺寸与堆覆速度关系

堆覆速度变大时,焊道的宽度和高度同时下降。主要由于送粉速度固定时,单位时间融化的金属粉末固定。当堆覆速度变大时,有两个方面的影响:一方面堆覆速度变大,单位时间内基板受到的热输入量变小,焊道热影响区域变小。另一方面,堆覆速度变大,成形一条焊道内熔融的金属粉末变少,这两个因素均使焊道的成形尺寸减少。

(3) 送粉速度对单道尺寸的影响规律。

根据之前研究,送粉速度与成形尺寸影响试验设置为:固定堆覆电流为 45 A,堆覆速度为 300 mm/min,送粉速度在 6~11 g/min 范围,以每 1 g/min 为一个梯度变化,共六组试验。图 7 显示了不同送粉速度下的单层焊道高度和宽度,随着堆覆速度从 6 g/min 上升至 11 g/min 时,焊道的宽度由 3.53 mm 上升至 4.45 mm,焊道的高度由 1.69 mm 上升至 2.81 mm。

图 7 单层焊道成形尺寸与送粉速度关系

送粉速度增大时,焊道的层高和层宽均增大。

堆覆电流和堆覆速度不变,单位时间基板和粉末所接受到的能量不变。在能量输入足够的前提下送粉速度的增加,则为焊道提供了更多熔融的金属液滴。当液滴增多时,焊道的宽度和高度都会增大。

2 多层单道工艺—尺寸模型

2.1 试验设计

为减少试验的试验次数,确保模型的稳定性,本试验设计选用三因素二次旋转设计方法。其设计就是使距试验中心点距离相等的点上,预测值的方差相等。

本试验选取了三个重要因素作为输入参数,堆覆电流、堆覆速度、送粉速度作为 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 。试验目的是预测工艺参数对多层堆焊的尺寸影响规律。因此选择焊道的平均宽度 B 和平均高度 H 为相应函数。得到表 3 二次旋转组合试验的设计因素水平。

表 3 二次旋转组合试验的设计因素水平

试验因素	堆覆电流	堆覆速度	送粉速度
水平	/A	/(mm/min)	/(g/min)
-2	20	200	4.6
-1.682	23	232	5.1
-1	30	300	6.3
0	40	400	8
1	50	500	9.7
1.682	57	568	10.9
2	60	700	11.4

2.2 尺寸模型建立

将每个直臂体试件的稳定区的焊道宽度、高度测量多次取平均值,其测量结果如表 4 所示。

2.2.1 层宽模型

堆覆电流、堆覆速度、送粉速度三个自变量组成三列的矩阵,得到自变量 X 。取直臂体宽度数据组成因变量矩阵 Y 。通过 Matlab 软件进行计算则可得到计算得到了回归方程的完整表达式为

$$B = 0.0048I^2 + 9.62 \times 10^{-6}V_1^2 - 0.018V_2^2 - 1.25 \times 10^{-6}IV_1 + 0.0085IV_2 - 0.00029V_1V_2 - 0.39I - 0.0096V_1 + 0.45V_2 + 12.28 \quad (2)$$

对回归方程的拟合分析,发现该回归模型的相关系数的平方(R^2)为 0.960 6,即相关系数 R 为 0.980 1。且回归方程的显著性检验 $F=27.12 > F_{0.95}(9,10)=3.02$ 。说明焊道的宽度和电流、堆覆速度、送粉速度之间存在着显著性关系,设计的方案是正确的,回归方程模型有意义的。

表 4 直臂体试件稳定区焊道的层宽层高

序号	Z1	Z2	Z3	堆覆电流/A	堆覆速度/(mm/min)	送粉速度/(g/min)	焊道宽度/mm	焊道层高/mm
1	1	1	1	50	500	9.7	7.35	0.48
2	1	1	-1	50	300	9.7	8.65	0.62
3	1	-1	1	50	500	6.3	6.23	0.38
4	1	-1	-1	50	300	6.3	7.00	0.49
5	-1	1	1	30	500	9.7	5.89	0.58
6	-1	1	-1	30	300	9.7	6.85	0.77
7	-1	-1	-1	30	500	6.3	5.01	0.45
8	-1.682	0	0	30	300	6.3	6.11	0.48
9	1.682	0	0	23	400	8	6.80	0.61
10	0	-1.682	0	57	400	8	8.20	0.38
11	0	1.682	0	40	400	5.1	4.59	0.54
12	0	0	-1.682	40	400	10.9	7.33	0.74
13	0	0	1.682	40	232	8	6.87	0.52
14	0	0	0	40	568	8	5.90	0.44
15	0	0	0	40	400	8	6.11	0.47
16	0	0	0	40	400	8	6.13	0.46
17	0	0	0	40	400	8	6.08	0.49
18	0	0	0	40	400	8	6.14	0.5
19	0	0	0	40	400	8	6.16	0.48
20	0	0	0	40	400	8	6.06	0.47

将工艺参数代入到拟合回归方程中, 通过不同参数下的拟合值与实际值进行对比。利用误差率检验, B_1 为宽度理论值, B_2 为宽度的实际值, E 为理论值与实际值的误差率。其中误差率的计算公式

$$E = \frac{|B_1 - B_2|}{B_2} \quad (3)$$

直臂体宽度的最大误差率为 5.47%, 最小误差率为 0.27%, 平均误差为 2.51%。可见该模型预测值与实际值拟合良好, 模型有效的。

图 8 成形宽度拟合值与实际值的误差率

将堆覆电流、堆覆速度、送粉速度三个因素中的一个因素置于零水平(即电流为 40 A、堆覆速度 400 mm/min、送粉速度 8 g/min), 可得到堆覆层宽度的二元二次方程, 根据方程作出二因素的曲面相应函数。将各个参数规范化, 则可得各个参数与直

臂体宽度的影响规律曲线, 如图 9 所示。堆覆电流、堆覆速度、送粉速度对直臂体宽度的影响并不是独立的, 而是相互交互影响, 其对宽度影响程度由大到小分别为堆覆电流、送粉速度、堆覆速度。

2.2.2 层高模型

与焊道宽度建模一致, 也将堆覆电流、堆覆速度、送粉速度三个自变量组成三列的矩阵, 得到自变量 $\mathbf{X}$ 。取直臂体高度数据组成因变量矩阵 $\mathbf{Y}$ 。通过 Matlab 软件则可得到计算得到了回归方程的完整表达式为

$$H = 3.94 \times 10^{-5} I^2 - 1.32 \times 10^{-6} V_1^2 + 0.019 V_2^2 - 3.75 \times 10^{-6} IV_1 - 0.001 4 IV_2 - 0.000 14 V_1 V_2 + 0.004 4 I + 0.000 93 V_1 - 0.14 V_2 + 0.799 \quad (4)$$

对回归方程的拟合分析, 发现该回归模型的相关系数的平方(R^2)为 0.939 6, 即相关系数 R 为 0.969 3。且回归方程的显著性检验 $F=17.27 > F_{0.95}(9,10)=3.02$ 。说明焊道的高度和电流、堆覆速度、送粉速度之间存在着显著性关系, 设计的方案是正确的, 回归方程模型有意义的。

将工艺参数代入到拟合回归方程中, 通过不同参数下的拟合值与实际值进行对比。利用误差率检验, 将各个数据用折线图表示, 如图 10 所示。直臂体高度的最大误差率为 9.00%, 最小误差率为 0.30%, 平均误差为 4.49%。可见该模型预测值与实际值拟合良好, 模型有效的。

图 9 工艺参数交互作用图

图 10 成形宽度拟合值与实际值的误差率

与宽度影响分析一致,将堆覆电流、堆覆速度、送粉速度三个因素中的一个因素置于零水平(即电流为 40 A、堆覆速度 400 mm/min、送粉速度 8 g/min),可得到堆覆层高度的二元二次方程,根据方程作出二因素的曲面相应函数。将各个参数规范化,则可得各个参数与直臂体层高的影响规律曲线,如图 11 所示。可以看到对宽度影响程度由大到小分别为送粉速度、堆覆电流、堆覆速度。

图 11 直臂体成形宽度拟合值与实际值对比

2.3 模型精度验证

为进一步验证模型的预测精度,进行 2 组典型直臂体零件成形的测试。与上述试验成形条件一致,

成形 20 层，测量直臂体的层宽。宽度测量结果如表 5 示，零件 1 中，宽度的预测值 5.77 mm，实际成形宽度为 5.58 mm，其误差率为 3.4%；零件 2 的误差率 2.8%。两个零件误差率相对较低，均能控制在 4% 以内。高度测试结果如表 5 零件 1 中，宽度的预测值为 0.48 mm，实际成形宽度为 0.50 mm，其误差率为 4.0%；零件 2 中，宽度的预测值为 0.84 mm，实际成形宽度为 0.87 mm，其误差率 2.8%。两个零件误差率相对较低，也都能控制在 4% 以内。说明两个模型的准确性都较高。

表 5 宽度和高度预测验证

零件	宽度		高度	
	1	2	1	2
堆覆电流/A	35	45	35	45
堆覆速度/(mm/min)	450	450	450	450
送粉速度/(g/min)	8	12	8	12
预测值/mm	5.77	7.69	0.48	0.84
实际成形尺寸/mm	5.58	7.48	0.50	0.87
误差率(%)	3.4	2.8	4.0	3.4

3 性能测试

选取固定的工艺参数，拉伸试样的工艺参数选取直臂体成形试验中成形形貌较好的工艺参数，堆覆电流 35 A、堆覆速度 450 mm/min、送粉速度 8 g/min。

图 12 直臂体样件

图 13 拉伸件取样的位置横向、纵向取样

取样完成，进行抛光打磨后进行拉伸试验，得到拉伸性能见表 6。可以看出等离子增材制造成形的零件其水平和竖直方向的平均拉伸强度均大于 560 MPa，远远大于铸造件的 480 MPa 的拉伸强度。而且水平方向的拉伸强度在 575 MPa，竖直方向的拉伸强度在 560 MPa，增材成形零件水平方向的拉伸强度略大于竖直方向的拉伸强度。316L 不锈钢样件的屈服强度在各个方向上变化不明显，约为 310 MPa。

表 6 力学性能测试

样件	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	平均屈服强度 /MPa	平均拉伸强度 /MPa
水平方向	307	584	309	575
	307	573		
	314	569		
垂直方向	317	569	314	560
	310	556		
	316	555		
铸造件			177	480

4 结论

(1) 小电流、大堆覆速度与小电流、小送粉速度导致能量输入不足产生不连续(球化、断续)的焊道，大电流、小堆覆速度导致能量输入过大产生宽大的焊道，大送粉速度粉末飞溅严重。在合适的工艺窗口内电流增大焊道宽度增大，焊道高度减小，宽度的影响程度大于高度；堆覆速度变大，焊道宽度高度都减小；送粉速度增大，焊道宽度高度都增大。

(2) 利用 Matlab 软件对层宽层高进行数值分析，得到了层高层宽的回归模型。模型相关系数 R 较大，显著度较高。通过两组试验对不同参数下层宽层高的真实值与拟合值进行对比，发现层宽的误差率分别为 3.4%、2.8%，层高的误差率分别为 4.0%、3.4%，其结果均不超过 5%，进一步验证拟合效果良好。

(3) 对回归方程多因素交互分析，各工艺参数对直臂体层宽层高的影响并不是独立的，而且影响程度不同。对宽度的影响程度顺序为：堆覆电流>送粉速度>堆覆速度；对层高的影响程度顺序为：送粉速度>堆覆电流>堆覆速度。

(4) 直臂体零件进行力学性能分析，发现拉伸强度达到了 560 MPa 以上较铸造件的 480 MPa 有明显提高。

参 考 文 献

- [1] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1-4.
LU Binghen, LI Dichen. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology [J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(4): 1-4.
- [2] 江宏亮, 姚巨坤, 殷凤良. 丝材电弧增材制造技术的研究现状与应用[J]. 热加工工艺, 2018, 47(18): 25-29.
JIANG Hongliang, YAO Jukun, YIN Fengliang. Research status and application of wire arc additive manufacturing technology[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(18): 25-29.
- [3] 杨永强, 刘洋, 宋长辉. 金属零件 3D 打印技术现状及研究进展[J]. 机电工程技术, 2013, 42(4): 1.
YANG Yongqiang, LIU Yang, SONG Changhui. The status and progress of manufacturing of metal parts by 3D printing technology[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2013, 42(4): 1.
- [4] 杨永强, 陈杰, 宋长辉, 等. 金属零件激光选区熔化技术的现状及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 9-21.
YANG Yongqiang, CHEN Jie, SONG Changhui, et al. Current status and progress on technology of selective laser melting of metal parts[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 9-21.
- [5] 颜永年, 齐海波, 林峰, 等. 三维金属零件的电子束选区熔化成形[J]. 机械工程学报, 2007, 43(6): 87-92.
YAN Yongnian, QI Haibo, LIN Feng, et al. Selective electron beam melting of three dimensional metal parts[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(6): 87-92.
- [6] 黄卫东, 林鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(6): 12-27.
HUANG Weidong, LIN Xin, Research progress in laser solid forming of high performance metallic component[J]. Materials China, 2010, 29(6): 12-27.
- [7] 郭超, 林峰, 葛文君. 电子束选区熔化成形 316L 不锈钢的工艺研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(21): 152-158.
GUO Chao, LIN Feng, GE Wenjun. Study on the fabrication process of 316L stainless steel via electron beam selective melting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(21): 152-158.
- [8] 黄卫东, 李延民, 冯莉萍, 等. 金属材料激光立体成形技术[J]. 材料工程, 2002(3): 40-43.
HUANG Weidong, LI Yanmin, FENG Liping, et al. Laser solid forming of metal powder materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2002(3): 40-43.
- [9] 杜乃成. 弧焊机器人金属快速成形研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
DU Naicheng. Study on metal rapid prototyping based on arc welding robot[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [10] 胡晓冬, 赵万华. 等离子弧焊直接金属成形技术的工艺研究[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(5): 540-542.
HU Xiaodong, ZHAO Wanhua. Process research for direct metal forming based on plasma arc welding[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2005, 24(5): 540-542.
- [11] 张海鸥, 熊新红, 王桂兰, 等. 等离子熔积成形与铣削光整复合直接制造金属零件技术[J]. 中国机械工程, 2005, 16(20): 1863-1866.
ZHANG Haiou, ZHAO Xinhong, WANG Guilan, et al. Direct manufacturing technology of metal parts by hybrid plasma deposition shaping and milling finishing[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16 (20): 1863-1866.
- [12] 尹凡. 不锈钢电弧增材制造成形工艺研究及尺寸精度控制[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
YIN Fan. The research on process parameters and size control of arc additive manufacturing for stainless steel [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [13] 温斌和. 薄壁构件等离子增材制造成形特性及尺寸控制[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
WEN Binhe. Forming characteristics and dimensional control of thin-walled components with plasma arc and wire additive manufacture[D]. Tianjin : Tianjin University, 2016.
- [14] 罗震, 张禹, 贾鹏. Ti-6Al-4V 钛合金等离子弧堆焊增材制造工艺研究[J]. 焊接, 2016, 36(4): 13-16.
LUO Zhen , ZHANG Yu , JIA Peng. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V titanium alloy parts based on micro-plasma arc surfacing[J]. Welding & Joining, 2016, 36(4): 13-16.
- [15] 许可可, 陈克选, 仇文杰, 等. 等离子增材制造设备与其工艺研究[J]. 热加工工艺, 2017, 47(23): 221-224.
XU Keke, CHEN Kexuan, QIU Wenjie, et al. Study on equipment and process of plasma arc additive manufacturing[J]. Hot Working Technology, 2017, 47(23): 221-224.
- [16] YANG D, HE C, ZHANG G. Forming characteristics of thin-wall steel parts by double electrode GMAW based additive manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 227: 153-160.

作者简介: 杨永强, 男, 1961 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为激光材料加工和快速成型制造。

E-mail: meiyqiang@scut.edu.cn

宋长辉(通信作者), 男, 1986 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为金属 3D 打印与个性化医学。

E-mail: chsong@scut.edu.cn