

电弧热丝变极性等离子弧增材制造铝合金成型尺寸预测

卢振洋, 刘峰, 蒋凡, 陈树君, 余旭, 李方

(北京工业大学 汽车结构部件先进制造技术教育部工程研究中心, 北京 100124)

摘要: 电弧热丝变极性等离子弧 (arcing-VPPA) 对传热与传质的可靠控制使其在电弧增材制造方面拥有独特的优点。针对单道多层铝合金堆砌试样, 利用二次通用旋转组合方法针对性地设计了单壁墙试验样本, 通过多次回归方程建立了单壁墙成型尺寸与工艺参数之间关系的数学模型。结果表明, 模型能够较好地预测单壁墙的熔敷尺寸, 真实值与拟合值基本一致。同时发现, 等离子电流、行走速度、送丝速度对层高的影响较为明显, 且等离子电流与焊接速度对层高的影响存在交互作用; 而对熔宽影响较明显的是等离子电流、变极性脉冲 MIG 电流以及焊接速度。同时分析了增材成型熔宽尺寸稳定性控制策略, 发现等离子电流以等差数列排序的控制方案在增材宽度的稳定性控制上具有明显优势。

关键词: 电弧热丝 VPPA; 增材制造; 二次通用旋转组合; 模型尺寸预测; 调控方案

中图分类号: TG444

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)02-0524-07

近年来随着制造技术的蓬勃发展, 3D 打印逐渐在复杂曲面、单壁墙、高精度器件方面显示出其独特的优势^[1-9], 且其在小批量生产过程中可以显著降低制造成本与生产周期, 优势明显。其中以丝材为主要原料的电弧增材制造 (WAAM) 技术, 具有成本低、效率高的优点, 得到了广泛的应用^[10-13]。对于电弧增材制造技术来说, 保证零件的成型尺寸以及加工过程的稳定性是其必须首先面对的一个重要目标。单壁墙零件是通过单道熔敷层金属的逐层叠加而成型, 因而影响其成型尺寸及成型质量的主要因素为单道熔敷层尺寸及层间搭接, 而要获得良好的上述成型条件离不开对焊接工艺参数、可控层间温度及物理、数学模型的建立、分析与研究。

目前在研究焊接工艺参数^[14-19]、层间温度^[20-23]、神经网络^[24-27]、电磁场^[28]等对增材成型质量的影响已有许多成果。在通过建立数学模型对电弧增材成型尺寸进行预测的研究上, 南昌大学的张光云^[29]通过建立 2 个神经网络模型验证了用工艺参数预测工件尺寸的模型精度很好。柏久阳^[30]对 TIG 电弧增材试样尺寸进行了建模与验证, 发现试样的拟合值与熔宽真实值符合程度良好。肯塔基大学的 Zhang 等人^[31]对熔化极气体保护焊 (GMAW) 增材制造零件的三维建模、分层切片等关键技术进行了研究并改进了零件的成型精度。然而, 在增材制造过程中影响成型尺寸的因素并非是

单一的, 而是多个工艺参数综合作用的结果, 且成型尺寸也并非单一尺寸, 而是包括了熔宽、层高、壁墙厚度一致性等多个关键因素, 其在零件的成形过程中尤为重要。然而, 现有的 WAAM 技术多是电弧堆焊向增材制造的简单移植, 制造过程中丝材熔化能量和熔池热输入相互耦合, 对基体不可避免的存在多余的热力冲击; 同时在涉及多工艺参数综合影响增材成型尺寸及建立稳定成型尺寸的科学方法等方面还需深入研究。

电弧热丝变极性等离子弧 (Arcing-VPPA) 因其在传热、传质方面的可靠控制使其在铝合金增材制造领域具有独特的优势。本工作针对铝合金 Arcing-VPPA 熔丝增材制造过程, 研究了熔敷层尺寸在不同焊接参数下的变化过程与熔宽尺寸的稳定调控方法; 基于二次通用旋转组合设计^[32]方法, 建立了基于 Arcing-VPPA 的增材制造成型尺寸预测模型; 讨论了影响熔敷层尺寸的焊接工艺因素及熔宽调控方案, 对增材制造过程的稳定性和成型尺寸预测开展研究, 为铝合金 WAAM 技术提供参考依据。

1 实验

1.1 工艺特性

Arcing-VPPA 增材制造技术以变极性等离子电弧作为主弧, 以变极性脉冲 MIG 电弧作为旁路电弧, 耦

收稿日期: 2018-05-07

基金项目: 北京市自然科学基金 (3172004); 先进焊接与连接国家重点实验室开放课题研究基金 (AWJ-16-M06)

作者简介: 卢振洋, 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 北京工业大学汽车结构部件先进制造技术教育部工程研究中心, 北京 100124, 电话: 010-67392267, E-mail: lzy@bjut.edu.cn

合过程如图 1 所示。图中等离子弧在钨极与工件之间起弧，主要提供对熔池的热输入，实现传热过程；MIG 电弧在钨极与焊丝之间起弧，主要用来熔化焊丝，实现传质过程；在此过程中通过分别调节主弧与旁路电弧的焊接参数，达到焊接过程中对传热、传质的可靠控制。同时等离子弧的加入可以促使熔滴更快地长大并在等离子弧的等离子流力与 MIG 电弧的电磁收缩力的共同作用下定向过渡到熔池，进而实现熔滴过渡过程可控和丝材的高效熔敷。

1.2 实验设备

实验中采用德国 CLOOS 公司的交流脉冲 MIG 焊机电弧作为旁路，北京工业大学焊接技术研究所的变极性等离子焊机电弧作为主路，通过使用自行搭建的两电弧耦合匹配电路，分别使旁路电弧在丝材与钨极之间起弧，主路电弧在钨极与母材之间起弧，从而使旁路电弧与主路电弧实现交流耦合过程。实验选用厚度为 6 mm 的 T6061 铝合金作为基板，焊丝选用牌号为 ER4043、直径为 1.2 mm 的铝合金焊丝。

2 熔敷层尺寸建模

2.1 实验设计方法

采用二次通用旋转组合设计方法获取模型样本，可以在减少实验量的同时尽可能不对实验结果产生不良影响。同时由于在该工艺条件下，等离子电流 I_p 、变极性脉冲 MIG 电流 I_m 、送丝速度 V_s 、焊接速度 V_h 4 个参数变量可以直接影响成型件的热量分布与表

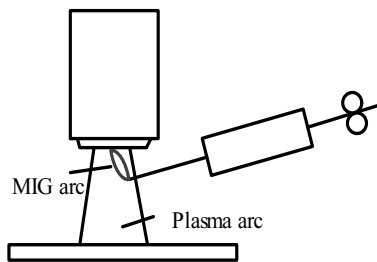


图 1 两电弧耦合示意图
Fig.1 Two arc coupling diagram

面形态，从而对增材制造熔敷层尺寸产生影响。因此将各参数变量的区间范围进行规范化处理到[-1.682, 1.682]（二次通用旋转组合设计参数表中 4 参数变量一般对应的规范化参数为 1.682）之间，得到四因素五水平的二次通用旋转组合实验设计。通过二次通用旋转组合设计的参数表得知，在实验需要部分实施的基础上，需要进行 20 组实验，各因素水平如表 1 所示。

2.2 模型的建立

利用二次通用旋转组合设计，将在不同参数下的增材成型试样稳定区域熔宽（单道熔敷层金属的宽度）和层高（单道熔敷层金属厚度）通过多次测量取平均值，并对数据进行整合。利用响应面法及多次回归模型，借助 Design-Expert 软件对层高及熔宽进行线性拟合，并根据拟合结果对回归方程进行线性拟合度检验，回归系数检验以及方差计算。从而用多项式来近似拟合响应值与输入变量参数之间真实的函数关系，得到的层高、熔宽多元回归方程式为：

$$W_1 = 2 - 0.054 T_1 + 0.15 T_3 - 0.1 T_4 + 0.11 T_1 T_4 + 0.094 T_2 T_4 + 0.24 T_1 T_2 T_4 \quad (1)$$

$$W_2 = 7.84 + 0.24 T_1 + 0.37 T_2 + 0.15 T_3 - 0.44 T_4 + 0.24 T_2^2 + 0.22 T_3^2 + 0.12 T_4^2 \quad (2)$$

因素变量等离子电流 I_p 、变极性脉冲 MIG 电流 I_m 、送丝速度 V_s 、焊接速度 V_h 分别对应于规范变量 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 。为了检验方程的准确性，对其进行方差分析，主要包括方差齐性检验（ F 检验）和 P 检验， P 值如果小于 0.05，则表示误差因素对试验结果影响较小，该试验过程是合适的。方程的显著性检验通过相关系数 R^2 对其进行检验， R^2 的值通常为介于 0~1 之间的常数，且越接近于 1，则该方程的显著性越强，即拟合出来的回归方程越准确。

通过对以上两回归方程进行拟合度检验，求得层高的回归模型的相关系数（ R ）为 0.964，相关系数的平方 R^2 为 0.929，接近于 1；同时求得其 F 值为 30.59， F 值的显著性概率为 $P < 0.001$ ，即 $P < 0.05$ ，校正决定系数 $R^2 = 0.929$ ，表明该方程达到显著水平，具有统计意义。同理，求得熔宽 F 值为 3.82， F 值的显著性概

表 1 四因素五水平正交实验

Table 1 Four factors with five levels orthogonal experiment

Level	Plasma current, I_p/A	Variable polarity MIG current, I_m/A	Wire feed speed, $V_m/mm \cdot min^{-1}$	Welding speed, $V_h/mm \cdot min^{-1}$
-1.682	70	60	6000	360
-1	75	65	6250	400
0	85	75	6750	480
1	95	85	7250	520
1.682	100	90	7500	600

Four factors: I_p, I_m, V_m, V_h

率为 $P=0.0185$, 即 $P<0.05$, 表明该方程达到显著水平, 具有统计意义。校正决定系数 $R^2=0.866$, 回归方程较好地描述各因素与响应值之间的真实关系, 可以利用该回归方程确定最佳焊接工艺条件。

2.3 预测精确度检验

为了更直观地预测模型的精度, 将 4 个变量因素与 2 个因变量的实际值及与其多元回归方程拟合得到的拟合熔宽、层高进行整理, 得到试样成型尺寸真实值与模型拟合值的对照图, 如图 2 所示。其因变量的误差率, 如图 3 所示。

从图 3 的增材试样数据可以看出, 层高的误差率大多低于 $\pm 5\%$, 最大的误差为 9.37% ; 而熔宽的误差率同样如此, 绝大多数低于 $\pm 5\%$, 最大误差为 7% ; 虽然在拟合的过程中出现了误差值大于 5% 的个别现象, 但其与 5% 误差值的绝对值最大也仅为 $0.07\text{ mm}<0.1\text{ mm}$, 因此, 该拟合方程的拟合数值误差值在允许范围之内, 可以对回归方程的可靠性与准确性进行证明, 并用于推测给定参数下增材成型试样的成型尺寸。

为了进一步验证模型在预测增材成型尺寸方面的准确性, 在模型的参数范围内找到一组复合成型参数, 并对其进行增材制造试验, 以此参数下试验增材成型墙壁为样本, 对其进行熔宽、层高的测量, 并以真实值与拟合值进行对比, 以此检验数学模型以及拟合多项回归方程的可靠性。试验参数如表 2 所示, 成型单壁墙试样如图 4 所示。

将试验参数代入上述原始变量回归方程中, 得到拟合熔宽为 7.48 mm , 拟合层高为 1.72 mm , 真实熔宽与拟合熔宽的误差为 0.03 mm , 误差率为 0.3% , 同时真实

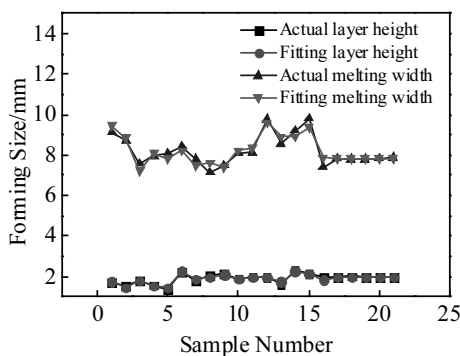


图 2 试样成型尺寸真实值与模型拟合值

Fig.2 Actual value and model fitting value of sample forming size

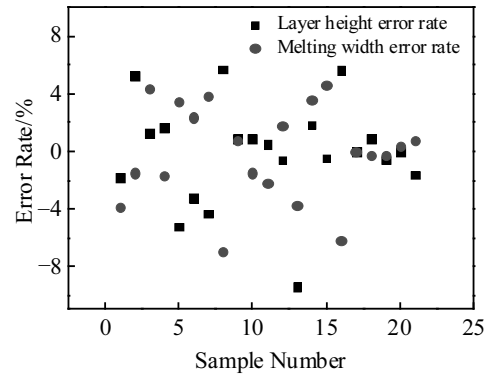


图 3 试样成型尺寸真实值与拟合值的误差率

Fig.3 Error rate of actual value and fitting value of sample forming size

层高与拟合层高误差值为 0.06 mm , 误差率为 3.6% , 两项参数的误差率均控制在 5% 以内, 由此可以验证, 该模型预测成型尺寸的精确度较高, 建立的模型有效可靠。

3 试样成型尺寸影响因素分析

在四因素水平下得到了关于增材成型层高的线性回归方程, 方程有效地反映了 4 种变量对成型尺寸的影响。为了探究单个变量对成型尺寸的影响, 将线性方程中的单个因素进行求解偏导, 从而可以直观地反映出单个变量的影响规律, 将 4 个变量变为原始变量代入层高方程为:

$$W_1 = -110.22 + 1.12 I_p + 3 \times 10^{-4} V_s + 0.245 V_h - 2.96 \times 10^{-3} I_p V_h - 3.39 \times 10^{-3} I_m V_h + 4.16 \times 10^{-5} V_p I_m V_h \quad (3)$$

从式 (3) 中可以看出, 单项变量中, 等离子电流、送丝速度、焊接速度对层高起到主要作用, 变极性 MIG 电流对其影响不太显著, 只存在于多因函数项中。对含有 I_m 的项进行舍弃后并对前 3 种变量分别求偏导得:

$$\frac{\partial W_1}{\partial V_s} = 3 \times 10^{-4} \quad (4)$$

$$\frac{\partial W_1}{\partial I_p} = 1.12 - 2.96 \times 10^{-3} V_h \quad (5)$$

$$\frac{\partial W_1}{\partial V_h} = 0.245 - 2.96 \times 10^{-3} I_p \quad (6)$$

由式 (4) 可以看出, 偏导结果为正, 说明送丝速度对增材成型的层高起正相关作用, 即随着送丝速度

表 2 增材成型单壁墙主要参数

Table 2 Main parameters of additive forming single wall

Plasma current, I_p/A	Variable polarity MIG current, I_m/A	Wire feed speed, $V_s/mm \cdot min^{-1}$	Welding speed, $V_h/mm \cdot min^{-1}$	Actual layer height/mm	Actual melting width/mm
95	75	6500	600	1.66	7.51



图 4 单壁墙成型试样

Fig.4 Single wall forming specimen

的提高，层高也会相应增高；从式（5）中可以看到，在对等离子电流求偏导后并没有得到常数，而是得到了与焊接速度相关的函数。由函数关系可以看出，随着焊接速度的提高，层高等离子电流的偏导量减小，即单位等离子电流引起的层高变化量减小，也说明了大的焊接速度下等离子电流对层高的影响小于低速下等离子电流对层高的影响；同理由式（6）可以得到，随着等离子电流的增加，层高等焊接速度的偏导量减小，即单位焊接速度引起的层高变化量减小，也说明了大的等离子电流下焊接速度对层高的影响小于小的等离子电流下焊接速度对层高的影响。同时说明了等离子电流与焊接速度对层高的影响存在交互作用。从图 5 中变量

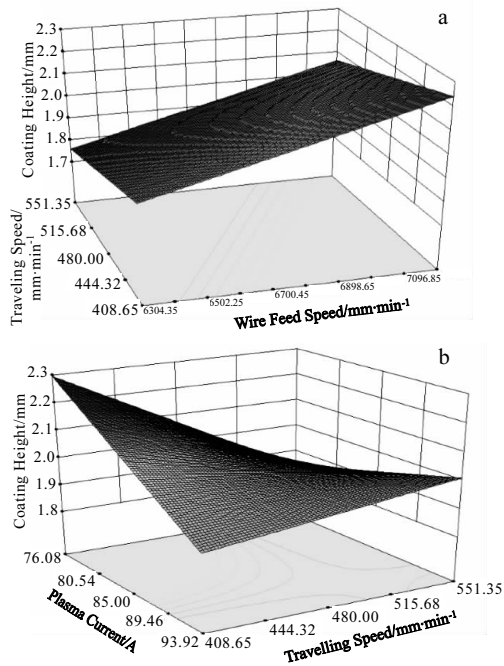


图 5 送丝速度、焊接速度、等离子电流与层高的三维关系图
Fig.5 Three-dimensional relationship between wire feed speed, welding speed, plasma current and layer height

与因变量的三维立体关系图中同样可以直观地看出，此三变量对层高的影响规律，与以上分析一致。

同理，将原始变量代入四变量对熔宽的作用回归方程中，得到公式为：

$$W_2 = 75.17 + 0.0268 I_p - 0.41 I_m - 0.0144 V_s - 0.029 V_h + 3.01 \times 10^{-3} I_m^2 + 1.089 \times 10^{-6} V_s^2 + 2.38 \times 10^{-5} V_h^2 \quad (7)$$

从式（7）中可以看出，单项变量中，等离子电流、变极性 MIG 电流、焊接速度对熔宽起到主要作用，送丝速度对其影响不太显著，只存在于高次项中。对含有 V_s 的项以及二次项进行舍弃后并对其余 3 种变量分别求偏导得：

$$\frac{\partial W_2}{\partial I_p} = 0.0268 \quad (8)$$

$$\frac{\partial W_2}{\partial V_h} = -0.029 + 4.76 \times 10^{-5} V_h \quad (9)$$

$$\frac{\partial W_2}{\partial I_m} = -0.41 + 6.02 \times 10^{-3} I_m \quad (10)$$

从式（8）中可以看出，等离子电流对熔宽的偏导数为一个常数项，表明在此实验条件下熔宽随等离子电流的增大而变宽；而从式（9）、（10）可以看出，焊接速度、变极性 MIG 电流的偏导数都为其自己的一次函数，且系数大于零。通过对焊接速度函数求解得知，在 $V_h=609$ mm/min 时为熔宽的最小值，而在本实验中，焊接速度的最大值取为 600 mm/min，因而其与熔宽的关系为负相关；同理，变极性 MIG 电流也为熔宽的凹函数。通过求解得知，熔宽的最小值出现在 68 A 附近，而在本实验中 MIG 电流基本大于 68 A，因此其与熔宽为正相关。从图 6 中变量与因变量的三维立体关系图中同样可以直观地看出，此三变量对熔宽的影响规律，与以上分析一致。

4 增材成型熔宽尺寸稳定调控方案

增材成型过程中熔宽的大小对增材壁厚以及成型件的外观尺寸影响较为明显，因而建立熔宽成型尺寸的模型可以较好地预测给定工艺参数下的稳定成型尺寸。但增材成型件的熔宽存在逐渐增大至趋于稳定状态的特点，如图 7 所示，从而需要采取调控措施保证增材件成型尺寸的均匀稳定。

基板对不同熔敷层的散热作用是不同的，因而可以通过改变热输入来达到熔宽尺寸的稳定可靠。通过熔宽的拟合方程可以看到等离子电流、变极性 MIG 电流、焊接速度是影响熔宽的 3 个主要因素，而若要通过改变焊接速度或变极性 MIG 电流来控制熔宽稳定会降低实验效率，增加不必要的繁琐，而通过改变等离子电流的方式简单易行，故而本研究采用逐层改变等离子电流的方式来保证熔宽尺寸稳定。

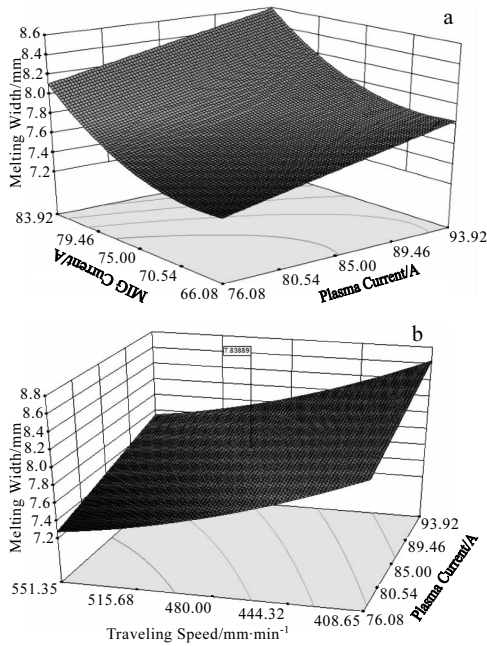


图 6 等离子电流、变极性脉冲 MIG 电流、焊接速度与熔宽的三维关系图

Fig.6 Three-dimensional relationship diagram of plasma current, variable polarity pulsed MIG current, welding speed and melting width



图 7 单壁墙截面熔宽趋势

Fig.7 Melting trend of single wall section

由之前实验可知，熔宽大致从第 5 层开始趋于稳定，因而先确定第 5 层的焊接参数，并利用拟合方程确定试样熔宽，再按照此熔宽寻找底层的等离子焊接电流。由此可以假设第 5 层的等离子电流为 I_5 ，再以相邻两层间的等离子电流的差值为调控单位，即：

$$(I_5 - I_4) : (I_4 - I_3) : (I_3 - I_2) : (I_2 - I_1) = a : b : c : d \quad (11)$$

在本研究中采取 3 种不同的调控方式来适应不同层间的散热而产生的成型尺寸变化，分别是：

I，等值数列： $a : b : c : d = 1 : 1 : 1 : 1$

II，等差数列： $a : b : c : d = 1 : 2 : 3 : 4$

III，等比数列： $a : b : c : d = 1 : 2 : 4 : 8$

为了稳定分析 3 种方案的调控效果，对增材成型试样顶部圆弧区以下每隔相同间距测量其熔宽值作为样本，通过方差计算公式求取方差。方差计算公式为：

$$S^2 = [(m_1 - \bar{m})^2 + (m_2 - \bar{m})^2 + \dots + (m_n - \bar{m})^2] \quad (12)$$

现以二次回归旋转组合设计的第 9 组为例，取其熔宽值为 7.47 mm，以此为基础进行熔宽尺寸调控。根据其焊接参数进行 3 种不同调控方式进行参数配比，等离子电流 (A) 配比结果如表 3 所示，同时绘制 3 种方案电流曲线图，如图 8 所示。

在此 3 种调控策略下得到的堆焊成型试样及截面图如图 9、图 10 所示，其对应方差如表 4 所示。

由图 9、10 及表 4 可以看出，3 种不同的调控方

表 3 3 种调控方案下等离子电流配比

Table 3 Plasma current matching under three control schemes (A)

Single wall layer number	5	4	3	2	1
Equivalence series	70	80	90	100	110
Arithmetic series	70	74	82	94	110
Equal number sequence	70	73	79	90	112

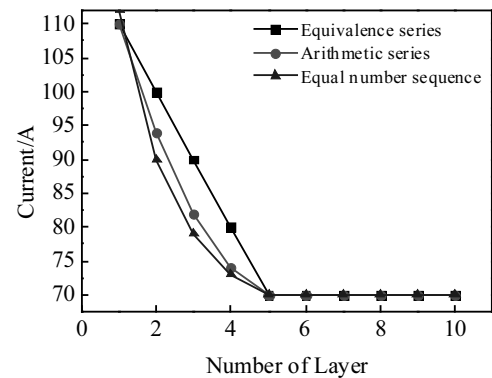


图 8 3 种调控方案电流对比曲线

Fig.8 Current comparison curves for the three control schemes

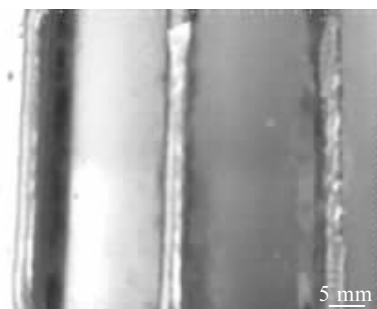


图 9 增材成型试样 (从左至右依次是策略 I、II、III)

Fig.9 Additive-molded samples (from left to right are strategies I, II, III)

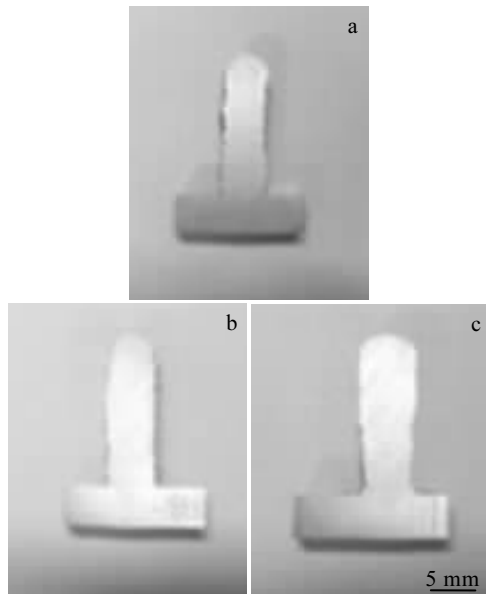


图10 3种调控方案成型截面图

Fig.10 Shaped cross-sections of the three control schemes:

(a) scheme I, (b) scheme II, and (c) scheme III

表4 3种调控方案方差值

Table 4 Variances of three control schemes

Scheme	I	II	III
Variance	0.11	0.04	0.22

案下得到的方差值大小不一, 其中以第2种调控方案即等差调控所得方差值最小, 为0.04, 同时可以看出, 在此方案下增材成型墙壁的截面熔宽上下稳定性很好, 因此将其定为最优选择方案。

引起熔宽不同的最主要原因为层间热平衡的失调, 尤其在前几层中此现象更为明显。层间热平衡主要受控于产热过程与散热过程的相对均衡, 其平衡公式为:

$$\eta U_p I_p + Q_p + Q_m = Q_c + Q_x \quad (13)$$

式中产热部分中的 $\eta U_p I_p$ 为两电弧对成型件的产热量, η 为电弧产热效率, U 、 I 分别为电弧对成型件的电压与电流, Q_p 为等离子流对成型件的传热, Q_m 为熔滴对成型件的传热; 散热部分中 Q_c 为成型件熔敷层对热量的散失量, Q_x 为成型件熔敷层对热量的吸收量。

在此WAAM成形过程中, U 、 Q_m 与 Q_x 需要设置为常量以维持制造过程的稳定性, Q_p 随电流 I 的变化为同步增大或减小, 因此影响成型件层间热平衡的关键在于 Q_c 与 I 及 Q_p 的平衡, 即主弧电流与 Q_c 的平衡。而 Q_c 在制造过程中与熔覆层和基板的接触面积直接相关, 且随着熔覆层数的逐渐增加而逐渐趋于常量。

通过上文分析知, 方案II为最佳方案, 因在此电流调控的条件下, 堆积初始阶段的层间热量补充与散

失相对稳定, 从而形成了一种可控层间热输入的调控方式, 使熔融金属的流动性基本一致, 更能适应此工艺方法下的增材成型。

5 结论

1) 基于响应面法可以建立焊接参数与成型特性(层高和熔宽)之间的多项次回归方程。可以利用该回归方程确定最佳焊接工艺条件并较好地预测成型试样的熔敷层尺寸。

2) 等离子电流、焊接速度、送丝速度对层高的影响较大, 且等离子电流与焊接速度对层高的影响存在交互作用, 并在小参数下对层高的影响更加灵敏; 而等离子电流、变极性脉冲MIG电流、焊接速度对熔宽的影响较大, 其中等离子电流、变极性脉冲MIG电流起正相关作用, 焊接速度起负相关作用。

3) 基于不同熔敷层的散热作用不同, 建立了增材成型熔宽尺寸稳定调控方案。确定了等离子电流以等差数列排序进行熔宽调控为最优方案。

参考文献 References

- [1] Yang Dejian(杨德建), Liu Renhong(刘仁洪). *Ordnance Industry Automation*(兵工自动化)[J], 2017, 36(2): 8
- [2] Xu Fangyuan(徐方远), He Jiankang(贺健康), Cao Yi(曹毅) et al. *National Conference on Special Processing* (全国特种加工学术会议)[C]. Beijing: China Society of Mechanical Engineering Special Processing Branch, 2015
- [3] Li Quan(李权), Wang Fude(王福德), Wang Guoqing(王国庆) et al. *Aeronautical Manufacturing Technology* (航空制造技术)[J], 2018, 61(3): 74
- [4] Li Xiaoli(李小丽), Ma Jianxiong(马剑雄), Li Ping(李萍) et al. *Process Automation Instrumentation*(自动化仪表)[J], 2014, 35(1): 1
- [5] Zhang Xuejun(张学军), Tang Siyun(唐思熠), Zhao Hengyue(肇恒跃) et al. *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2016, 44(2): 122
- [6] Du Yulei(杜宇雷), Sun Feifei(孙菲菲), Yuan Guang(原光) et al. *Journal of Xuzhou Institute of Technology, Natural Sciences Edition*(徐州工程学院学报, 自然科学版)[J], 2014, 29(1): 20
- [7] Bing-Henga L U, Di-Chenb L I. *Machine Building & Automation*[J], 2013(4): 30
- [8] Simranpreet S G, Munish K. *Advanced Manufacturing Processes*[J], 2009, 24(12): 1405
- [9] Stopp S, Wolff T, Irlinger F et al. *Rapid Prototyping Journal*[J], 2008, 14(3): 167
- [10] Zhang Rui(张瑞). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016

- [11] Xiong Jiangtao(熊江涛), Geng Haibin(耿海滨), Lin Xin(林鑫) *et al. Aeronautical Manufacturing Technology* (航空制造技术)[J], 2015, 493(23-24): 80
- [12] Xiong Jun(熊俊), Xue Yonggang(薛永刚), Chen Hui(陈辉) *et al. Electric Welding Machine*(电焊机)[J], 2015, 45(9): 45
- [13] Li Quan(李权), Wang Fude(王福德), Wang Guoqing(王国庆) *et al. Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2018, 61(3): 74
- [14] Tian Cailan(田彩兰), Chen Jilun(陈济轮), Dong Peng(董鹏) *et al. Aerospace Manufacturing Technology*(航天制造技术)[J], 2015(2): 57
- [15] Martina F, Mehnen J, Williams S W *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2012, 212(6): 1377
- [16] Ciurana J D, Serenóa L, Èlia Vallès. *Procedia Cirp*[J], 2013, 5: 152
- [17] Martukanitz R, Michaleris P, Palmer T *et al. Additive Manufacturing*[J], 2014, 1-4: 52
- [18] Krol T A, Seidel C, Zaeh M F. *Procedia Cirp*[J], 2013, 12: 169
- [19] Chacón J M, Caminero M A, García-Plaza E *et al. Materials & Design*[J], 2017, 124: 143
- [20] Xiong Jun(熊俊). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014
- [21] Zhao H, Zhang G, Yin Z *et al. China Welding*[J], 2011, 20(4): 1
- [22] Denlinger E R, Heigel J C, Pan M *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2015, 215: 123
- [23] Yang D, Wang G, Zhang G. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2017, 244: 215
- [24] Zhang Jihui(张吉会). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Shenyang: Shenyang University, 2016
- [25] Xue Y, Kim I S, Son J S *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2005, 164-165(20): 1134
- [26] Xiong J, Zhang G, Hu J *et al. Journal of Intelligent Manufacturing*[J], 2014, 25(1): 157
- [27] Xiong J, Zhang G, Hu J *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2013, 69(1-4): 743
- [28] Zhou Xiangman(周祥曼) Tian Qihua(田启华), Du Yixian(杜义贤) *et al. Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2018, 54(2): 84
- [29] Zhang Guangyun(张光云), Zhang Hua(张华), Xu Jianning(徐健宁) *et al. Welding Technology*(焊接技术)[J], 2008, 37(6): 40
- [30] Bo Jiuyang(柏久阳), Wang Jihui(王计辉), Lin Sanbao(林三宝) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2015, 36(9): 87
- [31] Zhang Y M, Chen Y, Li P *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2003, 135(2-3): 347
- [32] Yuan Zhifa(袁志发), Yun Haiyan(袁海燕). *Test Design and Analysis*(试验设计与分析)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007: 78

Forming Size Prediction of Additive Manufacturing Al Alloy by Arc-heated Wire VPPA Welding

Lu Zhenyang, Liu Feng, Jiang Fan, Chen Shujun, Yu Xu, Li Fang

(Engineering Research Center of Advanced Manufacturing Technology for Automotive Structural Components, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The arcing wire-VPPA has unique advantages in arc additive manufacturing due to its reliable control of mass transfer and heat transfer. Aiming at single channel multi-layer aluminum alloy additive manufacturing, a single side wall test sample was designed by the quadratic general rotation unitized design method, and the mathematical model between process parameters and molding size of the single side wall was established. The results show that the model can better predict the cladding size of the single side wall as the true value is basically the same as the fitted one. At the same time, it is found that the influence of plasma current, welding speed, and wire feeding speed on the layer height is obvious, and there is an interaction between the effect of plasma current and that of welding speed on the layer height. However, the effects of plasma current and variable polarity pulse MIG current and welding speed on the melting width are more obvious. At the same time, the control strategy of the widening dimension stability of the additive forming was analyzed. It is found that the control scheme of the plasma current in the arithmetic progression has obvious advantages in the stability control of the additive width.

Key words: arc-heated wire VPPA; additive manufacturing; quadratic general rotary unitized design; model size prediction; regulatory plan

Corresponding author: Jiang Fan, Associate Professor, Engineering Research Center of Advanced Manufacturing Technology for Automotive Structural Components, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China, Tel: 0086-10-67392267, E-mail: jiangfan513@qq.com