

# 等离子熔丝增材制造工艺参数对 RT-1400 钛合金成形性的影响

张鹏飞, 谢龙飞, 张凌峰, 刘蒙蒙, 姬坤海, 田权伟, 李 恒

(西安稀有金属材料研究院有限公司, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 采用二次回归正交实验方法, 研究等离子熔丝增材制造不同工艺参数因素对于 RT-1400 钛合金成形性的影响规律。结果表明: 焊接速度对熔宽的影响最大, 功率与送丝速率的交互对熔宽影响最小; 送丝速率对熔高的影响最大, 焊接速度对熔高影响最小; 功率与焊接速度的交互影响对于宽高比影响最大, 焊接速度对宽高比的影响最小; 熔深主要受到热输入量即功率的影响。二次回归模型对实际结果的预测值与实际值误差在 10% 以内, 预测结果良好。适用于 RT-1400 钛合金等离子熔丝增材制造工艺为: 焊接功率  $P=3$  kW、送丝速率  $WFS=2.4$  m/min、焊接速度  $T_s=0.2$  m/min、焊道间距为 5.3 mm、采用层间正交扫描方式。

**关键词:** 等离子熔丝增材制造; 工艺参数; 二次回归正交实验; 成形性

**中图分类号:** TG146.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2024)12-3457-08

增材制造技术按照热源不同可以分为激光、电子束和电弧 3 大类; 按照填充材料形貌可以分为粉材和丝材 2 类。当前, 应用于钛合金增材制造技术主要为激光直接制造 (LDM)<sup>[1-5]</sup>、激光束熔化 (LBM)<sup>[6]</sup>、激光选区熔化 (SLM)、电子束自由成形 (EBF3)<sup>[7-10]</sup> 及电弧熔丝增材制造 (WAAM)<sup>[11-13]</sup>。其中, 电弧为热源的 WAAM 技术依据是否熔化极可分为: 钨极气体保护焊 (GTAW)<sup>[4,14]</sup>、等离子弧增材制造 (PAM)<sup>[15]</sup>、熔化极气体保护焊 (GMAW)、冷金属过渡 (CMT)<sup>[16]</sup>。电弧熔丝增材制造技术具有设备成本低、原料成本低、生产效率高、易改造升级等特点, 在未来大规模工业应用及大尺寸结构件制备方面具有显著优势<sup>[17-18]</sup>。

成形性是衡量增材制造质量的重要指标之一, 而工艺参数能直接影响沉积体的成形性。相较于激光增材制造和电子束增材制造, 等离子熔丝增材制造技术中所涉及的工艺参数较多, 主要参数包括: 电流峰值及基值、电压峰值及基值、占空比、等离子气流量、保护气流量、焊接速度、送丝速率等。因此, 使用高效合理的实验方法确定工艺方案尤为重要。

正交实验<sup>[19]</sup>是一种高效的实验设计方法, 可以通过正交设计减少实验次数, 同时获得各因素对于响应结果的影响, 并优化实验方案, 从而获得合理的工艺

参数。但正交实验的结果具有局限性, 所得的最优结果仅限于已定的水平上, 并不一定是工艺区间的最优方案。采用回归分析可以有效分析实验数据, 并建立回归方程, 研究不同工艺参数对于响应结果的影响, 对实验结果进行预测和优化, 进一步采用二次回归分析, 可以减少实验次数, 同时完善交互项及二次项式的影响因素。在满足实验条件需要的同时减少实验组, 本研究使用二次回归正交的实验方法, 研究等离子弧不同工艺参数对成形性的影响规律, 在工艺参数范围内, 通过二次回归方程预测和优化实验方案, 最终确定了最优工艺参数, 为实验研究及实际生产提供理论支撑。

## 1 实验

等离子弧熔丝增材制造 (PAAM) 技术涉及的主要工艺参数包括峰值电流  $I_p$ 、基值电流  $I_b$ 、电压  $U$ 、送丝速率  $WFS$ 、焊接速度  $T_s$ 、占空比  $D_{cy}$  (基值电流时间/(基值电流时间+峰值电流时间),  $T_b/(T_b+T_p)$ )、等离子弧气流量和保护气流量等参数, 这些参数及其相互作用对成形性 (熔高、熔宽、熔深) 有影响。根据实际情况, 将等离子气流量、保护气体流量设置在满足工艺参数的范围内, 以峰值电流  $I_p$ 、基值电流  $I_b$ 、电压  $U$ 、送丝速率  $WFS$ 、焊接速度  $T_s$ 、占空比  $D_{cy}$  为研究对象。

收稿日期: 2023-12-17

基金项目: 陕西省重点研发计划 (2024GX-YBXM-227, 2024GX-YBXM-358); 陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目 (青年) (2023-JC-QN-0518); 秦创原引用高层次创新创业人才项目 (QCYRCXM-2022-290, QCYRCXM-2023-032, QCYRCXM-2022-286)

作者简介: 张鹏飞, 男, 1990 年生, 博士, 西安稀有金属材料研究院有限公司, 陕西 西安 710016, E-mail: a335662026@163.com

取 3 水平 6 因素进行正交实验，在考虑交互因素条件下，则所需实验次数为  $n=3^7$  次，实验次数过多，现实中难以实行。

综合以上因素，在实际的工艺参数范围内，将峰值电流  $I_p$ 、基值电流  $I_b$ 、电压  $U$ 、送丝速率 WFS、焊接速度  $T_s$ 、占空比  $D_{cy}$  这 6 个因素进行缩减。根据设备的实际使用情况将占空比  $D_{cy}$  设置为定值 50%，则电流均值  $I_{av}=(I_p+I_b)/2$ ，将峰值电流  $I_p$ 、基值电流  $I_b$ 、电压  $U$  使用功率  $P=I_{av}U$  代替。将工艺参数实验因素数量减少至 3。假设每组选定的参数都相互影响，为此，采用二次水平回归正交实验组合设计进行等离子弧增材制造工艺优化实验，即  $L_8(2^7)$  实验方案，研究交互自变量正交实验对成形性的影响，研究输出项分别取熔高 ( $H$ )、熔宽 ( $W$ )、宽高比 ( $W/H$ )、熔深 ( $D$ )。

选择合适的工艺参数范围是保证正交实验有效性的必要条件。选取工艺参数范围时主要考虑两方面因素，一方面考虑实验设备本身限定；另一方面，考虑实际操作中该材料的可行性相关。

设备参数范围  $I=30\sim 350\text{ A}$ ； $WFS=0\sim 5\text{ m/min}$ ； $T_s=0\sim 1.8\text{ m/min}$ 。由于设备最大承载电流为 350 A，但电流设定与钨极承受能力有关，钨极直径越大，越利于表面熔覆，但对成形性不利。此次实验进行多层 PAAM 需要满足成形性要求，选择钨极直径为 4 mm，则对应最大电流为 250 A，根据实际焊接，电流小于 100 A 时，钛合金沉积过程容易产生未熔合缺陷。同理，在相同热输入条件下，焊接速度过快或过慢都可能产生未熔合现象。

根据设备工艺范围及实际焊接经验，初步设定工艺范围： $160\text{ A}\leq I_p\leq 200\text{ A}$ ， $100\text{ A}\leq I_b\leq 140\text{ A}$ ， $20\text{ V}\leq U\leq 21\text{ V}$ ， $2.6\text{ W}\leq P\leq 3.6\text{ W}$ ， $2\text{ m/min}\leq WFS\leq 3\text{ m/min}$ ， $0.2\text{ m/min}\leq T_s\leq 0.3\text{ m/min}$ 。

取  $X_1=P$ ； $X_2=WFS$ ； $X_3=T_s$ 。所以， $X_1\in[2.6, 3.6]$ ； $X_2\in[2, 3]$ ； $X_3\in[0.2, 0.3]$ 。

根据自变量  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  范围，研究对象分别取熔宽  $W$  为  $Y_1$ ，熔高  $H$  为  $Y_2$ ，宽高比  $W/H$  为  $Y_3$ ，熔深  $D$  为  $Y_4$ ，如图 1 所示。

## 2 实验结果

### 2.1 正交实验

为了获得稳定的正交实验，需要将各实际因素进行线性编码，从而得到规范变量，再参考实验因素及因变量数目，确定合适的二次回归正交组合实验。所以，二次回归正交组合设计需要做如下处理：

#### (1) 因素水平编码

二次回归正交组合设计总实验次数可由公式 (1) 所得：

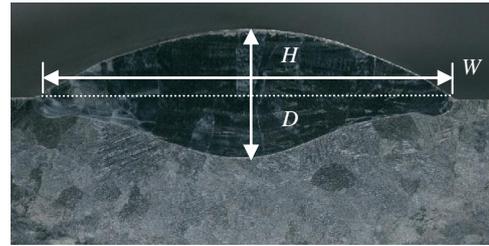


图 1 因变量 (熔宽、熔高、熔深) 测量示意图

Fig.1 Schematic diagram of dependent variables (weld width, weld height, weld depth) measurement

$$N=m_c+2m+m_0 \quad (1)$$

式中， $m$  为自变量因素， $m=3$ ； $m_c$  为二水平全面实验， $m_c=L_8(2^7)$ ，即 8 次； $m_0$  为零水平实验，令  $m_0=1$ 。求得  $N=15$  次。

星号臂长度  $\gamma$  必须满足公式 (2) 关系：

$$\gamma=\sqrt{\frac{(m_c+2m+m_0)m_c-m_c}{2}} \quad (2)$$

将数值带入公式 (2)，求得星号臂长度  $\gamma=1.215$ 。

设  $X_{j2}$ 、 $X_{j1}$  和  $X_{j0}$  分别表示因素  $X_j$  的上水平、下水平和零水平； $X_{j\gamma}$  与  $X_{j-\gamma}$  为因素  $X_j$  的上下星号臂水平； $\Delta_j$  为各因素变化间距。

$$X_{j0}=\frac{X_{j1}+X_{j2}}{2} \quad (3)$$

$$\Delta_j=\frac{X_{j\gamma}+X_{j0}}{\gamma} \quad (4)$$

$$Z_j=\frac{X_j+X_{j0}}{\Delta_j} \quad (5)$$

使用公式 (3)、(4) 及 (5) 对因素  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  的进行线性变化，其结果见表 1。

#### (2) 一次回归正交

取三因素两水平，采用  $L_8(2^7)$  一次回归正交后其编码，其编码结果如表 2 所示。

按照表 2 处理，编码公式就将各因素的实际取值

表 1 三因素水平编码表

Table 1 Code schedule of three-factor

Dependent variable, $Z_j$	Independent variable, $X_j$		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Upper asterisk arm, $\gamma$	3.729	3.1	0.25
Lower asterisk arm, $(-\gamma)$	2.492 25	1.9	0.15
Upper level (1)	3.6	3	0.24
Lower level (-1)	2.6	2	0.16
Zero level (0)	3.1	2.5	0.2
Variation interval, $\Delta_j$	0.5	0.5	0.04

表2 一次回归正交设计编码表

Table 2 Codes schedule of one-time regression orthogonal design

No.	Column number					
	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>12</sub>	Z <sub>13</sub>	Z <sub>23</sub>
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	-1	1	-1	-1
3	1	-1	1	-1	1	-1
4	1	-1	-1	-1	-1	1
5	-1	1	1	-1	-1	1
6	-1	1	-1	-1	1	-1
7	-1	-1	1	1	-1	-1
8	-1	-1	-1	1	1	1

X<sub>j</sub>相对于编码值 Z<sub>j</sub>, 编码后, 实验因素的水平被编写为 γ、1、0、-1、-γ。可得到三元二次回归正交组合设计表(表3)。

增加星号臂实验和零水平实验之后, 二次项失去了正交性。需要对二次项按照公式(6)进行中心化处理, 中心化处理结果如表3所示。

$$Z'_{ji} = Z_{ji}^2 - \sum_{ji} Z_{ji}^2 \quad (6)$$

式中, Z'\_{ji} 为中心化之后的编码; 二次项 Z\_{ji}^2 为自变量数, 编码后结构如表4所示。采用二次回归正交组合获得实验结果, 其单焊道截面如图2~图4所示。

从单焊道截面图可以看出在不同的工艺参数下, 焊道截面的变化明显, 熔池的熔高、熔深、熔宽不断发生变化, 熔池的形貌也各不相同; 总体上焊道与基板之间结合良好, 焊道中不存在气孔、开裂等缺陷, 经过腐蚀可以看出沿着高度方向生长的柱状晶, 但工艺参数不同会造成柱状晶的长度、宽度存在差异, 可以通过调整等离子熔丝增材制造工艺来改变晶粒的生长方向和纵横比。

表3 三元二次回归正交组合设计表

Table 3 Design table of ternary quadratic regression orthogonal combination

No.	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>12</sub>	Z <sub>13</sub>	Z <sub>23</sub>
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	-1	1	-1	-1
3	1	-1	1	-1	1	-1
4	1	-1	-1	-1	-1	1
5	-1	1	1	-1	-1	1
6	-1	1	-1	-1	1	-1
7	-1	-1	1	1	-1	-1
8	-1	-1	-1	1	1	1
9	1.215	0	0	0	0	0
10	-1.215	0	0	0	0	0
11	0	1.215	0	0	0	0
12	0	-1.215	0	0	0	0
13	0	0	1.215	0	0	0
14	0	0	-1.215	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0

表4 三元二次回归正交组合中心编码设计表

Table 4 Central coding design of three-element of quadratic regression orthogonal combination

No.	Z'1	Z'2	Z'3
1	0.270	0.270	0.270
2	0.270	0.270	0.270
3	0.270	0.270	0.270
4	0.270	0.270	0.270
5	0.270	0.270	0.270
6	0.270	0.270	0.270
7	0.270	0.270	0.270
8	0.270	0.270	0.270
9	0.747	0.747	0.747
10	0.747	0.747	0.747
11	-0.747	-0.747	0.747
12	-0.747	-0.747	0.747
13	-0.747	0.747	-0.747
14	-0.747	0.747	-0.747
15	-0.747	-0.747	-0.747

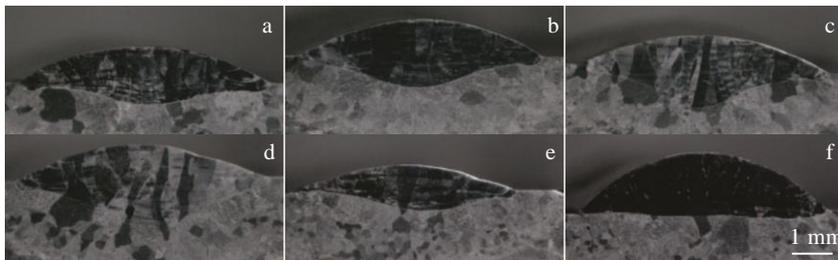


图2 1~6组单焊道截面照片

Fig.2 Single welding section images of 1-6 group: (a) P=3.6 kW, WFS=3 m/min, T<sub>s</sub>=0.24 m/min; (b) P=3.6 kW, WFS=3 m/min, T<sub>s</sub>=0.16 m/min; (c) P=3.6 kW, WFS=2 m/min, T<sub>s</sub>=0.24 m/min; (d) P=3.6 kW, WFS=2 m/min, T<sub>s</sub>=0.16 m/min; (e) P=2.6 kW, WFS=3 m/min, T<sub>s</sub>=0.24 m/min; (f) P=2.6 kW, WFS=3 m/min, T<sub>s</sub>=0.24 m/min

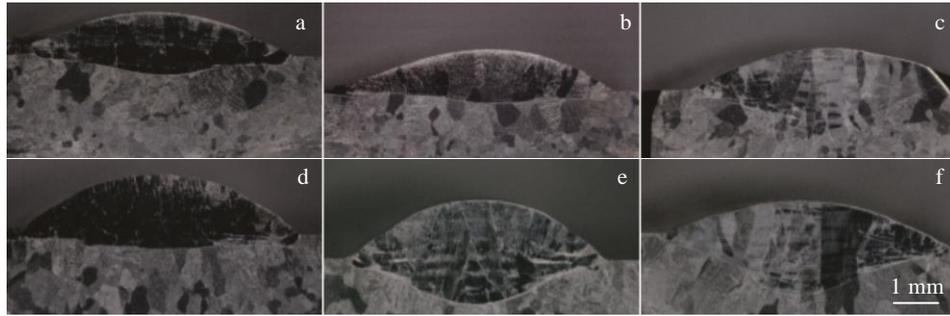


图 3 7~12 组单焊道截面照片

Fig.3 Single welding section images of 7-12 group: (a)  $P=2.6$  kW, WFS=2 m/min,  $T_s=0.24$  m/min; (b)  $P=2.6$  kW, WFS=2 m/min,  $T_s=0.16$  m/min; (c)  $P=3.7$  kW, WFS=2.5 m/min,  $T_s=0.2$  m/min; (d)  $P=2.5$  kW, WFS=2.5 m/min,  $T_s=0.2$  m/min; (e)  $P=3.1$  kW, WFS=3.1 m/min,  $T_s=0.2$  m/min; (f)  $P=3.1$  kW, WFS=1.9 m/min,  $T_s=0.2$  m/min

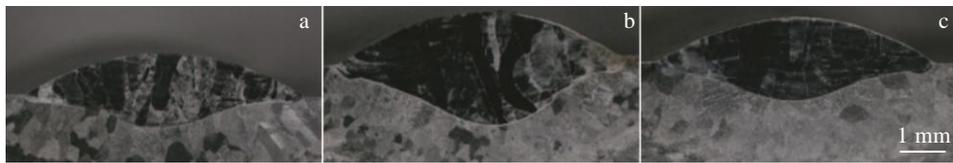


图 4 13~15 组单焊道截面照片

Fig.4 Single welding section images of 13-15 group: (a)  $P=3.1$  kW, WFS=2.5 m/min,  $T_s=0.25$  m/min; (b)  $P=3.1$  kW, WFS=2.5 m/min,  $T_s=0.15$  m/min; (c)  $P=3.1$  kW, WFS=2.5 m/min,  $T_s=0.2$  m/min

通过三元二次回归正交组合实验得到的单焊道截面响应统计结果见表 5。

### 2.2 实验结果

采用二次回归正交组合设计公式：

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^m \beta_j X_j + \sum_{k < j} \beta_{kj} X_k X_j + \sum_{j=1}^m \beta_{jj} X_j^2, \quad (7)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, m-1 (j \neq k)$$

式中， $Y$  是响应； $\beta_0$  为常量回归系数； $\beta_j$  为  $X_j$  相对应的线性回归系数； $\beta_{kj}$  为交互回归系数； $\beta_{jj}$  为  $X_j$  相对应的二次项回归系数。

采用 State-Ease Design-Expert 12 统计软件进行二次回归数理分析，获得响应结果如表 6 所示，经过回归分析所得：

确定回归系数后，根据因素系数的绝对值大小可判断各因素和交互作用下的影响大小，其正负表示各因素对实验指标影响的正负相关性。

熔宽影响大小的规律为： $C > A > A2 > B2 > AC > BC > B > C2 > AB$ ，可见焊接速度对于熔宽的影响最强，这是由于焊接速度决定了单位面积焊缝上的焊丝金属的熔敷量；功率和送丝速率的交互影响最弱；功率、送丝速率与熔宽呈现正相关性，焊接速度与熔宽呈现负相关，焊接速度越快，线能量减小，进而导致熔宽较小。

熔高的影响大小规律为： $B > AC > BC > A2 > C > B2 > AB > A > C2$ ，可见送丝速率对于熔高的影响最强，焊接速度的影响最弱；送丝速率与熔高呈现正相关，功率与焊接速度对熔高的影响呈现负相关。与对熔宽的影响相似，当送丝速率、功率一定时，焊接速度的增加会造成熔宽的减小。

表 5 三元二次回归正交组合设计实验结果值

Table 5 Results of three-element of quadratic regression orthogonal combination

No.	$Y_1$ /mm	$Y_2$ /mm	$Y_3$	$Y_4$ /mm
1	8.20	1.50	5.47	0.36
2	7.71	1.59	4.85	0.33
3	9.36	1.46	6.41	1.50
4	8.24	1.35	6.10	0.54
5	6.50	1.02	6.37	0.43
6	8.10	1.94	4.18	0.16
7	7.07	0.87	8.13	0.67
8	8.60	1.11	7.75	0.36
9	8.26	1.18	7	1.31
10	10.82	1.59	6.80	0.09
11	8.00	1.35	5.93	0.54
12	8.26	1.31	6.31	0.36
13	7.51	1.33	5.65	1.8
14	7.21	1.31	5.5	1.67
15	8.50	1.60	5.31	1.2

表 6 二次回归方程系数统计

Table 6 Statistics of quadratic regression equation coefficient

	$\beta_0$	A	B	C	AB	AC	BC	A2	B2	C2
$Y_1$	8.95	+0.7839	+0.1313	-0.8505	+0.015	-0.155	-0.135	-0.4428	-0.2396	+0.0279
$Y_2$	1.51	-0.0578	+0.1926	-0.1284	+0.085	+0.18	-0.17	-0.1314	-0.0907	-0.023
$Y_3$	5.81	+0.9229	-0.8691	-0.217	-0.9106	-1.2	+0.9781	+0.4784	-0.519	+0.2176
$Y_4$	1.25	+0.4608	-0.1338	+0.1269	-0.1212	+0.1213	+0.2838	-0.1166	-0.0591	-0.2657

Note: A, B, and C represent the influence of power, wire feeding speed and welding speed, respectively; AB, AC, BC, A2, B2 and C2 represent the influence of the interaction of various factors

宽高比的影响大小规律为:  $AC > BC > A > AB > B > B2 > A2 > C2 > C$ , 可见功率与焊接速度的交互影响对于宽高比影响最强, 焊接速度的影响最弱; 功率与宽高比呈现正相关, 送丝速率与焊接速度与宽高比呈现负相。因此, 可以通过功率与焊接速度的协同作用来控制熔池的宽高比。

熔深的影响大小规律为:  $A > BC > C2 > B > C > AC > AB > A2 > B2$ , 可见功率对熔深影响最强, 送丝速率的交互影响最弱。功率是成形过程主要的热量来源, 较高的功率会提供高的焊接能量, 从而提高熔深, 导致功率对熔深的影响最大。但是, 过高的功率会造成过度热输入, 影响焊合成形性。对于一定厚度和材料的构件, 功率应控制在合适范围内, 以达到最好的焊接效果。

### 3 讨论

#### 3.1 偏回归方差统计分析

回归系数可以反映各因素对响应结果的影响规律, 但不能表述模型和实际成形的拟合程度和影响的显著性关系状况。为了进一步研究模型因素对响应的显著程度, 对回归方程及偏回归系数的方差进行分析, 可确定回归方程, 检验回归方程的可信性等内容<sup>[20]</sup>。二次回归正交设计后, 响应与各因素所得模型的数据结果如表 7 所示, 采用  $R^2$ 、Adjusted- $R^2$ , Adeq Precision,  $F$ -value 统计量进行分析及显著性检验。本研究采用相关系数  $R$  检验法及  $F$  检验法对回归方程进行显著性检验。

##### (1) 相关系数 $R$ 检验法

$R$  为复相关系数, 描述变量  $Y$  与多个自变量  $X$  之间的线性相关度。即  $R^2$  为多线性回归方程的决定系数, 反映回归平方和在总离差平方和中的比重。所以  $R^2$  取值范围为  $[0, 1]$ , 当  $R^2 \approx 0$  时, 表明响应与自变量之间不存在任何线性关系, 但可能存在非线性关系; 当  $1 > R^2 > 0$ , 表明变量之间存在一定程度的线性相关关系。判断回归方程是否有显著性需要根据给定的显著性水平确定, 显著性检验要求  $R > R_{\min}$ 。若  $R^2 > R_{\min}$ , 则

$R > R_{\min}$ 。

本次实验 15 组, 自变量数量为 3, 根据二次回归方程  $R$  值<sup>[20]</sup>可知, 显著性水平取 0.05,  $R^2 > 0.712$ , 具有显著影响。由表 7 可知, 自变量  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  回归方程对响应的影响均大于 0.712, 为显著影响,  $Y_4$  的影响最弱。

##### (2) $F$ 值检验法

采用  $F$  检验法能够进一步检验回归方程与响应的显著性, 观察各自自变量因数对模型整体影响程度, 从而检验回归正交模型是否与实际的相关规律一致。使用模型  $F$  值与标准表对比结果来判断回归方程模型与实际的相关性程度, 当  $F > F_{0.01}$  为非常显著,  $F_{0.05} > F > F_{0.01}$  为显著相关,  $F > F_{0.10}$  为有关联。由二次回归方程  $F$  值<sup>[20]</sup>可知,  $F_{0.01} = 5.41$ ,  $F_{0.05} = 3.26$ ,  $F_{0.10} = 2.48$ , 各响应  $F$  值见表 8。

根据  $F$  值可知熔宽与熔高的显著性良好, 宽高比的显著性降低, 熔深与二次方程无相关性。根据系统建议后续使用一次回归进行重新拟合。

使用二次回归模型进行拟合其  $F$  值为 2.12,  $F < F_{0.1}$  回归方程与二次回归方程无相关性, 使用一次回归模型进行拟合时,  $F$  值为 4.3,  $F_{0.5} > F > F_{0.1}$  回归方程与实际之间有关联, 拟合一次方程结果为:

$$Y_4 = 0.9247 + 0.4608A - 0.1338B + 0.1269C \quad (8)$$

通过公式 (8) 的系数大小可以判断不同因素对成形性的影响大小, 其规律为  $A > B > C$ , 表明功率对熔深的影响最强, 说明热输入量的大小是影响熔深的主要因素。

#### 3.2 回归方程预测与实际结果

设定工艺参数  $P = 3 \text{ kW}$ 、 $WFS = 2.4 \text{ m/min}$ 、 $T_s = 0.2 \text{ m/min}$ ,

表 7 二次回归正交模型统计分析

Table 7 Statistical analysis performed on the quadratic regression orthogonal models

Response, $Y$	$R^2$	Adjusted- $R^2$	Pred- $R^2$	Adeq precision
$Y_1$	0.9172	0.7683	-0.0465	8.0618
$Y_2$	0.9273	0.7965	0.3967	10.3623
$Y_3$	0.8815	0.7483	0.8410	7.2913
$Y_4$	0.7924	0.4187	-1.3879	4.2796

表 8 二次回归正交模型显著性统计分析

Table 8 Statistical analysis of significance of the quadratic regression orthogonal models

Response, $Y$	Significance of total regression equation	
	$F$ -value	Significance
$Y_1$	6.16	***
$Y_2$	7.09	***
$Y_3$	3.81	**
$Y_4$	2.12	No

回归方程预测给出的结果见表 9，进行单道次沉积实验结果如图 5 所示。

由表 9 可知，实际结果与实际值之间存在 1.12%~9.34% 的误差，熔宽的误差值最小，而宽高比的误差值最大，这是因为宽高比为两者比值，增加了误差。整体误差在 10% 以内，表明预测值较为准确，回归方程对实际结果有较好的预测。

稀释率  $\tau$  计算如式 (9) 所示，对熔深实验结果及稀释率  $\tau$  进行统计，结果见表 9。

$$\tau = \frac{D}{D+H} \times 100\% \quad (9)$$

在本工艺参数下， $\tau=43\%$ ，根据实际经验，宽高比在 5~6 及稀释率在 40%~50% 时，多层沉积效果较好，因此本参数较为理想。

### 4 多道次搭接实验

在确定合适的工艺参数后，单层焊道的熔高和熔宽已经确定，在块体的成形过程中，随着相邻焊道间距的不同，会出现如图 6 所示的不同搭接关系。由图 6a 和 6b 可以看出当焊道间距过大时，会出现搭接不足或没有搭接的现象，导致成形表面起伏不停并对后续层的成形产生影响。如图 6d 焊道间距过小时，会出现搭接过度的现象，会直接影响到成形断面层高。因此，合适的焊道间距应保证相互搭接的成形表面呈现图 6c 所示的理想搭接状态，即成形后表面为平面。

#### 4.1 焊道间距的确定

以宽高比为 5.3 的情况来建立成形焊道搭接模型，

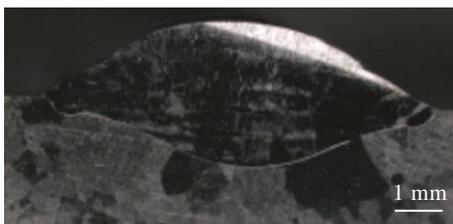


图 5 单焊道截面

Fig.5 Single welding section ( $P=3$  kW, WFS=2.4 m/min,  $T_s=200$  mm/min)

表 9 实际结果与预测值

Table 9 Actual value and predicted value

Parameter	Predicted value	Actual value	Decision value/%
$W/mm$	8.7	8.6	1.12
$H/mm$	1.5	1.6	6.25
$W/H$	5.8	5.3	9.34
$D/mm$	1.16	1.21	4.13

将单焊道界面设为理想圆弧模型，理想状态的搭接模型如图 7 所示。当两相邻焊道进行搭接时，由于第 1 条焊道的存在，会使得第 2 条焊道轨迹与第 1 条焊道轨迹重合部分的液态金属（曲边三角形 GDJ）补充到曲边三角形 ADB 中的区域。因此存在 1 个中心距，使得 A、M、B 三点共线，即成形表面为平面，在实际成形过程中在金属液滴表明张力的作用下搭接表面会收缩为曲面，但是为了简化分析过程，假设表面为理想平面。

设曲边三角形 ADM 与曲边三角形 NDJ 的面积相等，根据公式 (10)：

$$S_{\Delta ADM} = S_{\Delta NDJ} \quad (10)$$

并设点 O 为坐标系原点，2 个曲边三角形的顶点 D 的坐标为  $(X_D, Y_D)$ ，两者的面积分别为：

$$S_{\Delta ADM} = \int_0^{X_D} (r - \sqrt{r^2 - x^2}) dx \quad (11)$$

$$S_{\Delta NDJ} = \int_{X_D}^b [\sqrt{r^2 - x^2} - (r - h)] dx \quad (12)$$

求得交点 D 的坐标：

$$X_D = \frac{1}{h} \left[ \frac{r^2}{2} \arcsin \frac{b}{2r} - \frac{b}{4} (r - h) \right] \quad (13)$$

继而求得相邻焊道间的中心距：

$$a = 2X_D \quad (14)$$

相邻焊道间的搭接率：

$$\eta = \frac{b - 2X_D}{b} \quad (15)$$

根据上述公式计算了本次实验单道焊道宽度  $b=8.9$  mm 时  $a=5.34$  mm， $\eta=31.4\%$ 。

在实际实验中选择了 4.8、5.3、5.8 mm 作为焊道

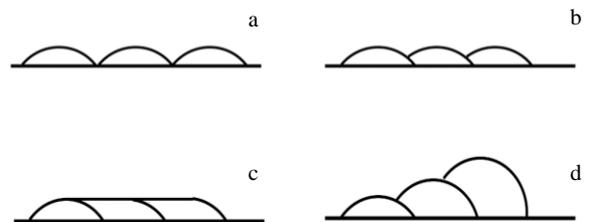


图 6 焊道搭接关系

Fig.6 Relationships of weld lap: (a) missed lap, (b) under lap, (c) ideal lap, and (d) over lap

间距进行了搭接实验,其搭接结果见图 8 所示。

图 8a 为焊道间距为 4.8 mm 时焊道截面,此时搭接间距小于理想状态,从图 8a 中可以看出焊道搭接后表现为过度搭接,搭接处突出,在这种状态下由于第 1 层平整度差会导致后续成形层的熔深不均匀,熔池形态发生改变,也会容易产生孔隙等缺陷。

图 8b 为焊道间距为 5.3 mm 时焊道截面,此时间距接近理想状态,从图 8b 中可以看出搭接截面较为平整,接近于理想状态,在此状态下进行沉积实验时,沉积层的厚度一致,熔深均匀,熔池形态稳定,同时乌日开西等<sup>[21]</sup>的研究表明在宽高比大于 4 时,等离子弧有效加热半径所作用的区域可以保证当前焊道与前一焊道的可靠熔接,同时避免了孔隙缺陷的产生。

图 8c 为焊道间距为 5.8 mm 时焊道截面,此时焊道间距大于理想间距,从图 8c 中可以看出相邻焊道之间凹陷明显,在此状态下沉积层平整度差,进行下一层沉积时容易因为熔深不够产生孔隙等缺陷影响成形性能。

综上所述,在理想状态下经过理论计算在焊道间距为 5.34 mm 时,为理想搭接间距搭接效果最好,考虑到实际实验过程中的剖分与路径规划,最终选择在 4.8、5.3、5.8 mm 的焊道间距进行多道次搭接,实验结果表明在 5.3 mm 时搭接效果良好,且在 4.8 mm 时出现了搭接过度,在 5.3 mm 时出现搭接不足的现象,表明 4.8~5.3 mm 中存在理想搭接间距,同时 5.3 mm 搭接表面平整,证明理论模型对实际实验具有良好的拟合。

### 4.2 扫描策略



图 8 不同焊道间距搭接效果

Fig.8 Lap effect of different weld spacing: (a) 4.8 mm, (b) 5.3 mm, and (c) 5.8 mm

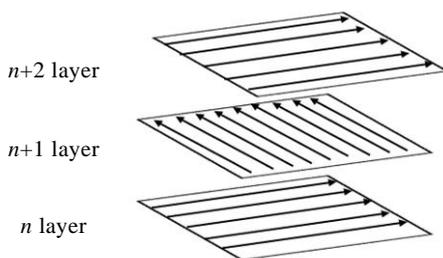


图 9 层间正交交替扫描成形方式

Fig.9 Orthogonal alternating scanning forming mode between layers

扫描策略的制定作为零件成形的关键步骤,会影响到最终的成形质量<sup>[22]</sup>。不同的扫描路径和填充路径,对零件及材料组织性能均会带来不同的影响。

成形零件为实心块体,截面形状简单,不存在空心,选择直线扫描策略,由于打印过程中熄弧、起弧过程的存在,在沉积焊道两端为坡面,又因为起弧过程存在一定的停顿时间,这会对两端熔池产生冲击作用,导致两端高度会低于平面,故而选择打印边框对沉积块体进行约束,同时在相邻沉积层之间采用层间正交的扫描方式(见图 9),Wang 等<sup>[23]</sup>和乌日开西等<sup>[21]</sup>研究表明采用层间正交扫描方式制备沉积件,其性能的各向均匀性得到了提高。同时避免了起弧熄弧位置重复导致两端塌陷的问题。

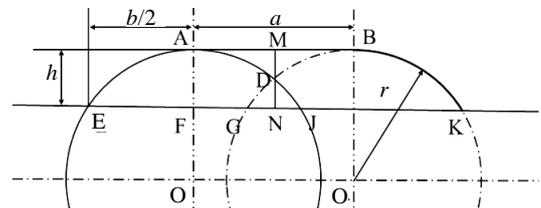


图 7 相邻焊道间理想状态搭接模型

Fig.7 Lap model in ideal state between adjoin weld bead ( $b$ -weld width,  $h$ -weld height,  $r$ -weld bead radius,  $a$ -center distance between adjoin weld bead; section EAJE-the first weld bead, section GBKG-the second weld bead; A-K represent different points)

## 5 结论

1) 焊接速度对熔宽的影响最强,功率与送丝速率的交互对熔宽影响最弱;送丝速率对熔高的影响最强,焊接速度对熔高影响最弱;功率与焊接速度的交互影响对于宽高比影响最强,焊接速度对宽高比的影响最弱;熔深主要受到热输入量即功率的影响。

2) 二次回归模型对实际结果的预测值与实际值误差在 10% 以内,预测结果良好。

3) 适用于 RT-1400 钛合金等离子熔丝增材制造工

艺为：焊接功率  $P=3$  kW、送丝速率  $WFS=2.4$  m/min、焊接速度  $T_s=0.2$  m/min、焊道间距为 5.3 mm、采用层间正交扫描方式。在焊道中心距为 5.3 mm 时搭接效果良好，使用平行焊道搭接及边框约束提高成形性能。

#### 参考文献 References

- [1] Kobryn P A, Semiatin S L. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2003, 135(2-3): 330
- [2] Kelly S M, Kampe S L. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2004, 35: 1861
- [3] Kelly S M, Kampe S L. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2004, 35: 1869
- [4] Brandl E, Baufeld B, Leyens C *et al.* *Physics Procedia*[J], 2010, 5: 595
- [5] Brandl E, Schoberth A, Leyens C. *Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 532: 295
- [6] Koike M, Greer P, Owen K *et al.* *Materials*, 2011, 4(10): 1776
- [7] Murr L E, Esquivel E V, Quinones S A *et al.* *Materials Characterization*[J], 2009, 60(2): 96
- [8] Al-Bermani S S, Blackmore M L, Zhang W *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2010, 41: 3422
- [9] Bush R W, Brice C A. *Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 554: 12
- [10] Taminger K, Hafley R A. *Electron Beam Freeform Fabrication: A Rapid Metal Deposition Process*[R]. Newtown: Plastics Engineering Society, 2003
- [11] Baufeld B, Van D B O, Dillien S. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2010, 41(8): 1917
- [12] Bernd B, Omer V B, Rosemary G. *Materials & Design*[J], 2010, 31: S106
- [13] Wang F, Williams S, Colegrove P *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2013, 44: 968
- [14] Birmingham M J, Kent D, Zhan H *et al.* *Acta Materialia*[J], 2015, 91: 289
- [15] Martin F A, Mehnen J, Williams S W *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2012, 212(6): 1377
- [16] Sun Z, Lv Y H, Xu B S *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2015, 80: 2007
- [17] Zhang J H, Yang Y, Cao S *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*[J], 2020, 33: 1311
- [18] Long P, Wen D H, Min J *et al.* *Materials*[J], 2021, 14(7): 1681
- [19] Grafarend E W, Awange J L. *Applications of Linear and Nonlinear Models*[M]. Berlin: Springer, 2012: 3533
- [20] Moore D S. *Mathematics Today Twelve Informal Essays*[M]. New York: Springer, 1978: 213
- [21] Wurikaixi Ai(乌日开西·艾依提), Zhao Wanhua(赵万华), Mamtimin G *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering (稀有金属材料与工程)*[J], 2012, 41(1): 134
- [22] Yang J W, Tang H B, Tian X J *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2023, 52(9): 3316
- [23] Wang Y, Tian H M, Shao J Y *et al.* *ACS Applied Materials & Interfaces*[J], 2016, 8(15): 10029

## Effect of Plasma Fuse Additive Manufacturing Process Parameters on the Formability of RT-1400 Titanium Alloy

Zhang Pengfei, Xie Longfei, Zhang Lingfeng, Liu Mengmeng, Ji Kunhai, Tian Quanwei, Li Heng  
(Xi'an Rare Metal Materials Institute Co., Ltd, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** The influence of different plasma fuse additive manufacturing process parameters on the formability of RT-1400 titanium alloy was studied by quadratic regression orthogonal experiment. The results show that the welding speed has the greatest influence on the welding width, and the interaction between power and welding speed has the least influence on the welding width. The effect of wire feeding speed on the melting height is the greatest, and the effect of welding speed on the melting height is the least. The interaction between power and wire feeding rate has the greatest influence on aspect ratio, and the welding speed has the least influence on aspect ratio. The melting depth is mainly affected by the heat input, i.e. the power. The error between the predicted value and the actual value of the quadratic regression model is less than 10%. The suitable parameters for the plasma fuse additive manufacturing process of RT-1400 titanium alloy: welding power  $P=3$  kW, wire feed speed  $WFS=2.4$  m/min, scanning speed  $T_s=0.2$  m/min, welding pass spacing=5.3 mm, using interlayer orthogonal scanning mode.

**Key words:** plasma fuse additive manufacturing; process parameters; quadratic regression orthogonal experiment; formability