

# TC4-TA1 等离子弧增材制造单道模型及成形研究

秦伟铭, 王克鸿, 叶约翰, 章晓勇

(南京理工大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:**合适的焊道尺寸及道间距对于控制增材制造过程中工件的表面成形起到至关重要的作用。采用高能量密度的等离子弧为热源,研究了两种材料(TC4 钛合金、TA1 纯钛为丝材)沉积单道的成形特性及焊道截面模型。结果表明:电流一定( $I_{TC4}=130\text{ A}$ ,  $I_{TA1}=140\text{ A}$ )、熔积比  $n \in (0,16)$  时, TC4、TA1 沉积单道截面均为抛物线模型,且  $n \in (6,10)$  时拟合误差值小于 2.5%;筛选出最佳增材工艺参数, TC4: 电流为 130 A、送丝速度为 1.8 m/min、行走速度为 3.5 mm/s; TA1: 电流为 140 A、送丝速度为 1.8 m/min、行走速度为 3.5 mm/s。异种材料增材最佳道间距为 0.738 W (W 为单道宽度)。

**关键词:** TC4-TA1; 等离子弧增材; 沉积单道模型; 工艺参数; 道间距

**DOI:** 10.14158/j.cnki.1001-3814.2019.14.015

中图分类号: TG456.2; TG455

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2019)14-0058-05

## Research on Single-bead Model and Forming of TC4-TA1 Plasma Arc Additive Manufacturing

QIN Weiming, WANG Kehong, YE Yuehan, ZHANG Xiaoyong

(School of Material and Science Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The appropriate single bead size and spacing play a crucial role in controlling the surface forming of the workpiece during additive manufacturing. Adopting high-energy density plasma arc as heat source, the forming characteristics and cross section model of the two materials (TC4 and TA1 wires) deposition single bead were studied. The results show that when the current is constant ( $I_{TC4}=130\text{ A}$ ,  $I_{TA1}=140\text{ A}$ ) and the melting ratio  $n \in (0,16)$ , the single-bead cross section of TC4 and TA1 are both parabolic models, further, the error is less than 2.5% when the melting ratio  $n \in (6,10)$ . The optimum process parameter, as TC4:  $I=130\text{ A}$ , WFS=1.8 m/min, TS=3.5 mm/s; TA1:  $I=140\text{ A}$ , WFS (Wire Feed Speed)=1.8 m/min, TS (Travel Speed)=3.5 mm/s, and the best bead spacing of additive manufacturing of dissimilar materials is 0.738 W (W is single channel width).

**Key words:** TC4-TA1; plasma arc additive manufacture; deposition single bead model; process parameters; bead spacing

基于等离子电弧为热源的电弧增材制造技术具有电弧集中、能量密度高、成形精度高的优势,被认为是一种制造高质量、高精密度构件的方法,尤其适合增材制造钛合金这类在传统“减材制造”工艺中加工性能差、加工工艺复杂、加工成本高、生产效率低<sup>[1]</sup>的难加工金属零件。因此,不少学者针对钛合金的等离子弧增材制造开展了相关研究。Lin 等<sup>[2]</sup>利用热输入逐层减弱的连续送丝等离子弧增材制造出 TC4 的直壁体,其力学性能超过锻造水平。乌日开

西·艾依提等<sup>[3]</sup>通过正交实验和成形温度对比测试的方法,研究了脉冲电流强度和占空比等 6 个重要工艺参数对 TC4 成形轨迹截面宽高比的影响规律,得出结论:脉冲电流强度和送丝速度是影响截面宽高比的显著因素,并用优化后的参数堆积出了长方体零件,但是文中并没有相关零件的实物图,也没有对成形质量及精度的描述。

目前,关于钛合金等离子弧增材制造的研究大多数仅停留在对增材单种材料、简单结构件的工艺研究,对于系统研究单个焊道截面模型和几何尺寸从而提高增材件表面成形精度和整体成形质量的研究还较少;而增材两种材料交织的特殊功能型零部件的研究更是鲜有报道。增材异材交织结构具有以下 2 个突出难点:第一,最优工艺参数的选择更为复杂;第二,内部结构更复杂,表面成形精度控制难度

收稿日期:2017-12-19

基金项目:总装备部研究项目(7131532)

作者简介:秦伟铭(1993-),男,重庆人,硕士研究生,主要研究方向为受控电弧增材制造技术、先进焊接方法及工艺;

电话:13770716825;E-mail:qwe9398@163.com

通讯作者:王克鸿,男,教授,Email:wkh1602@126.com

更大。利用等离子弧增材异种钛合金多尺度交织的复杂结构,在保证其成形精度和质量的同时综合提高工件特定的力学性能,这对制造出材料-结构-功能一体化的轻型先进特种材料具有重大研究意义。

本实验采用高能量密度的等离子弧为热源,TC4钛合金、TA1纯钛为丝材,对两种材料沉积单道的成形特性、焊道几何尺寸和焊道截面模型进行研究。得到在特定电流强度下,不同熔积比对应的焊道截面模型,筛选出最佳增材工艺参数,通过模型预测并实验验证了多道重叠的最佳道间距。

## 1 实验设备及方法

### 1.1 实验设备及材料

实验设备采用的是机器人-变位机等离子弧增材制造系统,如图1所示。该系统由瑞士ABB六轴协同智能机器人、福尼斯TransTig4000型焊机、PMW300等离子弧焊枪、等离子控制柜、二轴L型倾翻旋转式变位机以及自行设计外部双送丝机构组成。沉积单道的熔宽、熔高以及横截面实际面积由ZEISS AxioCam RMc5显微金相分析系统采集测量。

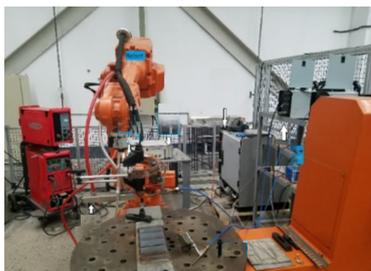


图1 机器人-变位机等离子增材制造系统  
Fig.1 Robot-positioner additive manufacturing system

实验材料为TC4钛合金焊丝和TA1工业纯钛焊丝,直径均为1.2mm,其化学成分如表1所示。基板选用200mm×200mm×6mm的TC4钛合金板,实验前通过砂轮机对基板表面进行打磨,以去除氧化层;并用丙酮清洗去除有机物。

表1 两种焊丝的化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of two wires (wt%)

材料	Fe	C	N	H	O	Al	V	Ti
TC4	0.250	0.085	0.016	0.008	0.100	6.122	4.105	余量
TA1	0.017	0.016	0.003	0.001	0.040	-	-	余量

### 1.2 实验方法

实验使用的气体为99.99%纯氩,离子气流量为0.8L/min,保护气流量为20L/min,钨极直径为4.8mm,内缩量为3mm,喷嘴口径为2.87mm,喷嘴到

工件距离为6mm。在实验过程中,先对基板进行预热处理,控制基板温度在50℃,每一道沉积结束后,待基板温度冷却到相同温度再进行下一道的实验,防止基板温度对沉积单道熔宽熔高的影响。增加气体保护拖罩对焊道进行焊后保护,拖罩气体流量为25L/min。利用线切割切取10mm沉积试样截面样件,粗磨,并用显微金相分析系统测量其熔宽、熔高以及焊道实际截面面积。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 电流对沉积单道几何尺寸的影响

大量前期实验证明,当电流 $I=130\text{A}$ 、送丝速度(Wire Feed Speed)WFS=1.5m/min、行走速度(Travel Speed)TS=3.5mm/s时,TC4、TA1沉积单道均成形良好。图2为取WFS=1.5m/min、TS=3.5mm/s不变,电流 $I$ 为120、125、130、135、140A进行实验时,两种材料沉积单道的宽、高对比图。可看出,随着电流 $I$ 的增大,总体热输入变大,焊道铺展性提升,即TC4和TA1沉积单道的熔宽 $W$ 逐渐增加;由于熔积比 $n$ 不变,相应的熔高 $H$ 逐渐减少,但两种材料沉积单道的宽高变化仍存在明显差异。TA1沉积单道在140A(实验最大电流)时熔宽最大,熔高最小;而TC4沉积单道由于其焊接流动性与TA1比较相对较差,在电流超过125A后就趋于稳定,变化不明

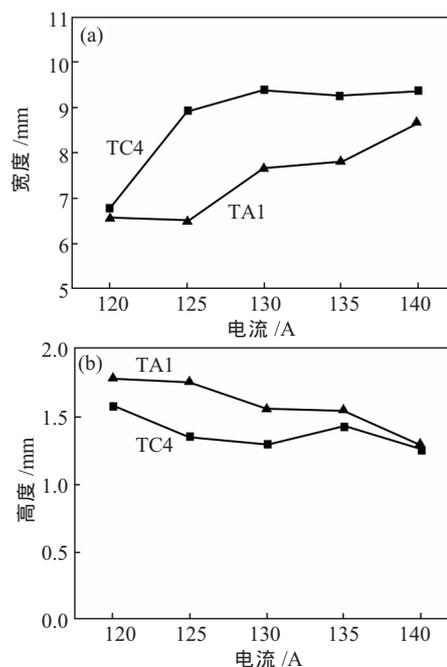


图2 电流 $I$ 对TC4、TA1沉积单道宽高影响曲线  
Fig.2 Effect curves of current on width and height of TC4 and TA1 deposition single bead

显。综合分析并结合实际,确定实验电流  $I_{TC4}=130\text{ A}$ 、 $I_{TA1}=140\text{ A}$ 。

## 2.2 沉积单道截面模型探究

增材电流确定之后,为探究两种材料在不同熔积比情况下的单道截面模型及熔宽  $W$ 、熔高  $H$ ,分别设计 18 组熔积比  $n=WFS/TS \in (0,16)$  这个区间进行沉积单道实验,工艺参数见表 2。

表 2 沉积单道工艺参数

Tab.2 Process parameters of single-bead deposition

熔积比 WFS/TS	电流 $I/\text{A}$		WFS $/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	TS $/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$
	TC4	TA1		
1.22	130	140	0.3	4.1
2.44	130	140	0.6	4.1
3.95	130	140	0.9	3.8
4.29	130	140	0.9	3.5
5.71	130	140	1.2	3.5
6.10	130	140	1.5	4.1
6.58	130	140	1.5	3.8
7.14	130	140	1.5	3.5
7.81	130	140	1.5	3.2
8.57	130	140	1.8	3.5
8.62	130	140	1.5	2.9
9.38	130	140	1.8	3.2
10.00	130	140	2.1	3.5
10.34	130	140	1.8	2.9
11.54	130	140	1.8	2.6
12.07	130	140	2.1	2.9
13.46	130	140	2.1	2.6
15.22	130	140	2.1	2.3

定义沉积单道横截面面积误差值  $E$ :

$$E = \frac{S_p - S_a}{S_a} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $S_p$  是沉积单道截面的理论面积; $S_a$  是沉积单道截面的实际面积。 $S_p$  根据拟合的模型不同(抛物线模型 parabolic、余弦函数模型 cosine、椭圆模型 ellipse、圆弧模型 arc),将沉积单道的宽度  $W$  和高度  $H$ ,曲线积分求得理论截面面积,计算公式有 3 种(圆弧模型与实际焊道截面模型相差过大,省略),见式(2)、(3)、(4)。

抛物线模型理论截面面积计算公式:

$$S_{p1} = \frac{2}{3} \times W \times H \quad (2)$$

余弦函数模型理论截面面积计算公式:

$$S_{p2} = \frac{2}{\pi} \times W \times H \quad (3)$$

椭圆函数模型理论截面面积计算公式:

$$S_{p3} = \frac{\pi}{4} \times W \times H \quad (4)$$

图 3 为两种合金截面面积相对误差值  $E$  曲线图。可看出,TA1 和 TC4 沉积单道截面模型均为拟合抛物线曲线误差值最小,余弦曲线次之,而拟合椭圆曲线误差值最大。不同点在于,TA1 沉积单道在熔积比  $n \in (1,16)$  区间内,误差值  $E$  整体波动不大,拟合抛物线误差值  $E$  大部分均在  $\pm 2.5\%$  范围以内,只有个别极端情况时,误差值  $E$  较大,最大约为  $5\%$ 。当熔积比较小时,以  $n=2.44$  为例,其对应的行走速度  $TS=4.1\text{ mm/s}$ ,为最大,由于电流一定,故其热输入最小,线能量较小,焊道铺展不开,导致焊道熔宽减少、熔高增加,即所谓的变“窄高”,从而导致拟合抛物线误差值  $E_p=4.54\%$ ,而拟合余弦函数误差值  $E_c=-0.16\%$ ,焊道模型向余弦函数转变。TC4 沉积单道在熔积比  $n \in (1,11)$  区间时,拟合抛物线误差值  $E$  在  $\pm 2.5\%$  范围以内,拟合度较高,而当  $n \in (11,16)$  区间时,最大误差值  $E$  为  $-7\%$ ,误差值较高,当熔积比较大时,以  $n=13.46$  为例,其对应行走速度  $TS=2.6\text{ mm/s}$  较慢,热输入较大,焊道铺展更开,所以熔宽  $W$  增加,但由于送丝速度  $WFS=2.1\text{ m/min}$ ,为最大,金属焊丝的填充量大,所以熔高  $H$  也增加,故焊道呈现出“饱满”的抛物线的形态(焊道截面模型有向椭圆转变的趋势),故拟合抛物线误差值  $E_p$  增加,拟合椭圆误差值  $E_e$  减小。

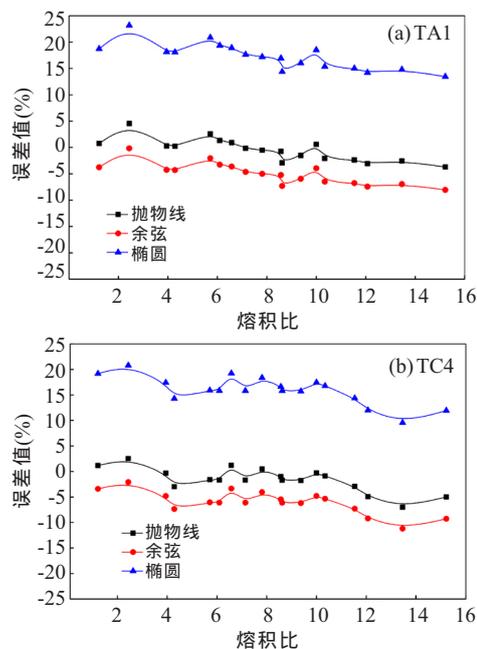


图 3 截面面积相对误差值  $E$  曲线图

Fig.3 Diagram of relative error of the cross-section area

综上, 电流  $I_{TC4}=130\text{ A}$ 、 $I_{TA1}=140\text{ A}$ , 熔积比  $n \in (0,16)$  时, TC4、TA1 沉积单道截面模型均为抛物线模型, 且在熔积比  $n \in (6,10)$  时, 拟合误差值  $E$  均小于 2.5%, 是有利于控制工件表面成形精度的参数范围。当熔积比过小时, TA1 沉积单道截面模型有向余弦函数模型转变的趋势; 当熔积比过大时, TC4 沉积单道模型有向椭圆模型轻微转变的趋势, 均不利于控制表面成形。

### 2.3 异材沉积单道增材工艺参数的筛选匹配

图 4 为 TC4、TA1 沉积单道的几何尺寸散点图。在增材过程中, 两种材料沉积单道几何尺寸的一致性对于整体的成形质量和精度尤为重要, 故对图 4 中 A、B、C 三个区域内(单道宽高接近)的点进行误差匹配。

定义两种材料沉积单道的宽度差值的平方与高度差值的平方之和为几何尺寸匹配误差  $E_d$ , 见式(5):

$$E_d = (w_1 - w_2)^2 + (h_1 - h_2)^2 \quad (5)$$

式中:  $w_1$ 、 $w_2$  为两种材料沉积单道的宽度;  $h_1$ 、 $h_2$  为两种材料沉积单道的高度。

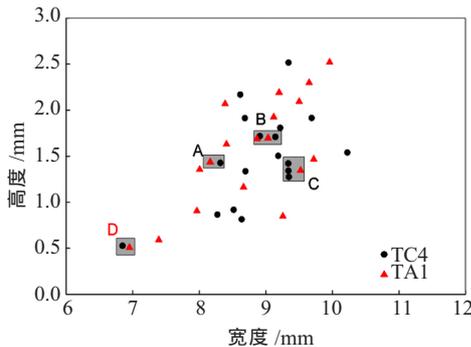


图 4 TC4、TA1 沉积单道几何尺寸散点图  
Fig.4 TC4&TA1 single bead geometry dimension

定义两种材料沉积单道的理论截面面积差值的绝对值与实际截面面积差值的绝对值之和为截面面积匹配误差  $E_s$ , 见式(6):

$$E_s = |S_{p1} - S_{p2}| + |S_{a1} - S_{a1}| \quad (6)$$

式中:  $S_{p1}$ 、 $S_{p2}$  为两种材料的理论截面面积;  $S_{a1}$ 、 $S_{a1}$  为两种材料的实际截面面积。

因此两种材料沉积单道几何尺寸和截面面积匹配的总误差为  $E_A = E_d + E_s$ ,  $E_A$  值越小, 说明两种材料单道的几何尺寸和截面积匹配度越好。通过计算得到 A 区域中总误差为 0.23, B 区域中总误差为 0.18, C 区域中的总误差为 0.20, 即 B 区域中第一组工艺参数的总误差  $E_A = 0.18$  最小。两种材料沉积单

道的匹配度最高, 且熔积比  $n \in (6,10)$  时, 两种材料焊道模型拟合抛物线的误差均小于 2.5%, 极大程度拟合抛物线曲线模型。综上分析可知, TC4:  $I=130\text{ A}$ 、 $WFS=1.8\text{ m/min}$ 、 $TS=3.5\text{ mm/s}$ 、 $n=8.57$ ; TA1:  $I=140\text{ A}$ 、 $WFS=1.8\text{ m/min}$ 、 $TS=3.5\text{ mm/s}$ 、 $n=8.57$  是最合适的增材工艺参数。

### 2.4 最佳道间距的预测和验证

图 5 为抛物线焊道重叠模型示意图。图 5 中假设两条沉积单道焊道 1 和焊道 2 的截面轮廓(宽度  $W$ 、高度  $H$  及轮廓模型)一致, 并且截面模型完全拟合抛物线函数模型, 则可将两条焊道轮廓看作两条抛物线函数:

$$y = ax^2 + c \quad (7)$$

$$y = a(x-d)^2 + c \quad (8)$$

式中:  $c=H$ ,  $a=-4H/W^2$ , 对于一个给定的焊道,  $c$  和  $a$  的值是固定的, 且只与焊道的熔宽、熔高有关。

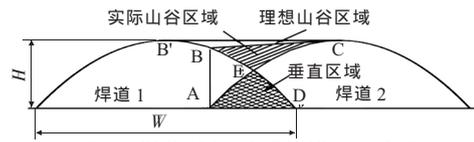


图 5 抛物线焊道重叠模型示意图  
Fig.5 Sketch map of two parabola bead overlap model

Xiong<sup>[4]</sup>等针对传统的 FOM (flat-top overlapping model) 焊道重叠模型进行了研究, 认为多道重叠山谷区域的面积为两条焊道边界和焊道顶点连线组成的区域, 即图 5 中  $S_{BEC}$ , 当  $d=d^*$  时, 两条焊道重叠之后, 重叠部分的金属体积刚好等于山谷区域体积, 重叠表面完全平整。故结合之前实验确定的焊道截面抛物线函数模型, 可计算出的表面绝对平整时的理论最佳道间距  $d^*=2/3W$ 。而 Ding 等<sup>[5]</sup>通过大量实验指出, 理想的绝对平整度在实际堆叠过程中是几乎无法实现的; 同时提出了 TOM (tangent overlapping model) 焊道重叠模型, 认为: 在实际的两条焊道的重叠过程中发现, 第二条焊道在第一条焊道上重叠的位置 B 和第二条焊道的熔宽是一致的, 即图 5 中 A、B 点的横坐标相同, 直线 BC 为两条焊道叠加过后实际的表面且与第二条焊道的轮廓相切。因此焊道重叠后存在着不可避免的小部分“绝对下凹”区域, 即图 5 中的空白区域  $S_{BBC}$ 。当  $d=d^*$  时,  $f(d) = S_{AED} - S_{BEC}$ , 根据焊道的抛物线函数模型计算得出方程只有两个有效根:  $d_1=W$ ,  $d_2 \approx 0.738W$ , 即根据抛物线模型的 TOM 重叠计算得到的理论最佳道间距为  $d^*=0.738W$ ; 当道间距  $d < d^*=0.738W$  时,  $S_{AED}$

增大、 $S_{BEC}$  减小、 $S_{BBC}$  减小,故重叠区域的下凹减少;但由于 BC 与第二条焊道保持相切,即重叠过后第二条焊道的熔高会增加,如图 6 所示。以此类推,多道重叠表面整体高度呈逐道上升的情况,且  $d$  越小,重叠区域面积越大,上升趋势就越明显。

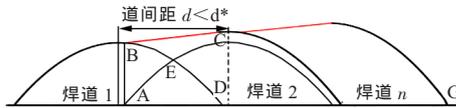


图 6  $d < d^*$  时,实际焊道重叠模型示意图  
Fig.6 Sketch map of multi-bead overlap when  $d < d^*$

故通过两种重叠理论计算的抛物线型焊道的理论最佳道间距出现差异,采用实验的方式来验证两种材料多道重叠的最优道间距,以比较两种焊道重叠模型的准确性和适用性。以预测值  $d^* = 0.738W$  为中心,对称的将实验道间距  $d$  设定为 TC4 沉积单道宽度  $W = 8.9\text{ mm}$  的  $0.976, 0.876, 4/5, 0.738, 2/3, 3/5, 1/2$ ,按照 TC4/TA1/TC4/TA1 的沉积方式进行多道交替重叠实验。

TC4 多道交替重叠截面图如图 7 所示。可看出,当  $d > 0.738W$  时,焊道重叠区域下凹明显,说明道间距过大,重叠区域体积远小于“山谷”面积,见图 7(a);当  $d = d^* = 0.738W$  时,焊道重叠区域出现轻微下凹,但波峰整体高度一致,表面成形与模型示意图一致,见图 7(b);当  $d = 2/3W$  时,焊道重叠区域表面趋于平整,但波峰整体高度呈上升趋势,见图 7(c);道间距继续减少则高度上升趋势更明显,并出现表面凸起,见图 7(d)。另外,TC4、TA1 同种材料多道重叠实验结果亦相同。

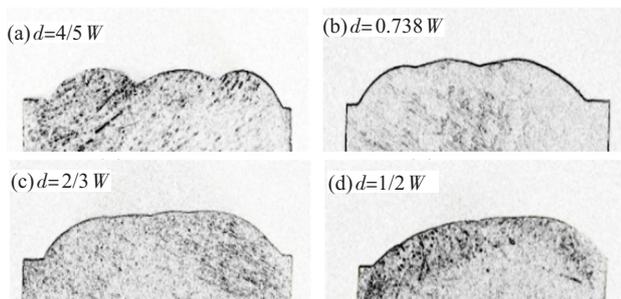


图 7 TC4、TA1 多道交替重叠截面图  
Fig.7 Section drawing of actual multi-bead overlap

综上,根据 TOM 焊道重叠模型计算的理论道间距  $d^* = 0.738W$  与实际实验结果相符,而根据 FOM 焊道重叠模型计算的理论道间距  $d^* = 2/3W$ ,实际实验中虽然重叠以后的下凹区域很小,但堆积层并非完全平整,整体高度呈上升趋势,与理论模型计算预测

的结果不一致。故 TOM(tangent overlapping model)焊道重叠模型理论与等离子弧增材制造的实际情况更接近,适用性更强。同时通过计算可知,“绝对下凹”区域面积的大小与抛物线系数  $a$  的绝对值呈正比,即重叠的沉积单道宽度越大,高度越小,下凹区域的面积越小,“山谷”越不明显,表面成形的平整度越高。

### 3 结论

(1) 电流对两种材料沉积单道几何尺寸影响较明显。当送丝速度为  $1.5\text{ m/min}$ 、焊接速度为  $3.5\text{ mm/s}$  时,随电流增加,TC4、TA1 沉积单道熔宽增加,熔高降低;由于 TC4 的焊接流动性较 TA1 差,故 TC4 沉积单道在  $I = 130\text{ A}$  时熔宽熔高达到临界值,趋于稳定;而 TA1 沉积单道在  $140\text{ A}$  (实验最大电流)时,熔宽最大,熔高最低。

(2) 电流  $I_{TC4} = 130\text{ A}$ 、 $I_{TA1} = 140\text{ A}$ ,熔积比  $n \in (0, 16)$  时,TC4、TA1 沉积单道截面模型均为抛物线模型,且在熔积比  $n \in (6, 10)$  时,拟合误差值  $E$  小于  $2.5\%$ ,是有利于控制增材质量和精度的参数范围。

(3) TOM(tangent overlapping model)焊道重叠模型理论更符合等离子弧增材制造的实际情况,实验验证了最佳道间距为  $d^* = 0.738W$ ;多道重叠以后的“绝对下凹”区域的大小与沉积单道的宽高比有关,单道的宽高比系数越大,对应的抛物线系数  $a$  的绝对值越小,下凹区域越小,故沉积单道宽高比大的工艺参数多道重叠后的表面成形平整度更好。

### 参考文献:

- [1] Lütjering G, Williams J C. Titanium [M]. USA:Springer Berlin Heidelberg,2007.
- [2] Lin J, LYu Y, Liu Y, et al. Microstructural evolution and mechanical property of Ti-6Al-4V wall deposited by continuous plasma arc additive manufacturing without post heat treatment [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials,2017,69:19-29.
- [3] 乌日开西·艾依提,赵万华,买买提明·艾尼,等. 基于等离子弧焊的 Ti-6Al-4V 快速成形工艺参数研究[J]. 稀有金属材料与工程,2012,41(1):878-882.
- [4] Xiong J, Zhang G, Gao H, et al. Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing,2013,29(2):417-423.
- [5] Ding D, Pan Z, Cuiuri D, et al. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM) [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing,2015,31:101-110.