

引用格式:肖洋,戴士杰,李世博,等.航空发动机叶片微束等离子堆焊转角焊缝模型研究[J].热加工工艺,2024,53(9):28-33.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20220920
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

航空发动机叶片微束等离子堆焊 转角焊缝模型研究

肖洋^{1,2}, 戴士杰^{1,2}, 李世博^{1,2}, 母嘉恒^{1,2}

(1. 河北工业大学 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300130; 2. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300130)

摘要:航空发动机叶片修复时,将受损部位切除后在新平面上进行多层多道焊接,在焊缝转角区域特别是转角点,因焊接工艺难以匹配导致过多熔滴进入熔池增加了焊缝熔高与熔宽,造成焊缝凸起,影响焊接质量。针对微束等离子焊接叶片转角区域焊缝的这种特征,建立了转角区域焊缝模型。首先利用抛物线曲线拟合建立了单道焊缝模型,并通过实验验证该模型能准确地表征单缝外形轮廓。然后提出了一种双焊缝转角重叠的焊缝成型模型。实验表明,采用该转角焊缝模型能够极大地降低转角区域焊缝的凸起,能满足航空发动机叶片修复精度的要求。

关键词:航空发动机叶片;微束等离子焊接;单缝模型;转角焊缝模型

中图分类号: TG455

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2024)09-0028-06

Study on Fillet Weld Model of Micro-Plasma Surfacing for Aero-Engine Blade

XIAO Yang^{1,2}, DAI Shijie^{1,2}, LI Shibo^{1,2}, MU Jiaheng^{1,2}

(1. The State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment Jointly Built by the Province and the Ministry, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: During the repair of aero-engine blade, the damaged part was firstly cut off, then multi-layer and multi-pass welding was carried out in the new plane. At the weld corner area especially corner point, due to improper welding process, too many droplets enter the weld pool to increase the weld height and width, which causes weld bulge and affects the welding quality. According to the weld characteristics of the corner zone of the blade during micro-plasma arc welding, the weld model of the corner zone was established. Firstly, a single pass welding seam model was established by Parabola curve fitting method, and the model was proved to be able to describe the profile of single pass welding seam accurately. Then, a weld forming model of double-weld fillet overlapping was proposed. The experiment shows that the model can greatly reduce the bulge of the fillet weld, and it can meet the requirements of the repairing precision of the aero-engine blade.

Key words: aero-engine blade; micro-plasma arc welding; single pass model; fillet weld model

航空发动机叶片作为航空发动机核心部件,长期工作在高温、高压、变载荷环境下,容易产生烧蚀、裂纹、蠕化等缺陷^[1]。由于受损叶片种类繁多且具有多种复杂空间曲线特征,在微束等离子焊接修复航空发动机叶片的过程中,为保证修复效率和质量,目前普遍将叶片受损部位切除并在新平面上进行多层

多道焊接修复。然而多道焊接过程中焊缝易在转角区域特别是转角点因焊接工艺难以匹配导致过多熔滴进入熔池,焊缝熔高与熔宽增大,造成焊缝凸起,影响焊接质量。为解决这一问题,亟需开展微束等离子焊接转角区域的工艺参数控制模型研究。

在焊接领域,有许多关于焊接参数和焊缝几何形状之间关系的研究。周祯童等^[2]分别用圆弧函数、椭圆函数和抛物线函数拟合焊缝截面轮廓。Cao等^[3]在熔化极惰性气体保护焊中用抛物线函数、正弦函数、高斯函数和对数函数拟合焊缝截面轮廓尺寸。刘理想等^[4]利用电弧增材系统分别探究了抛物线函数、正弦函数、圆弧函数和余弦函数拟合单道焊缝截

收稿日期:2020-08-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFB1311104)

作者简介:肖洋(1995-),男,四川达州人,硕士,主要研究方向:航空发动机叶片焊接修复;E-mail:mrxy678@163.com

通讯作者:戴士杰(1970-),男,河北保定人,教授,博士生导师,主要研究方向:航空发动机叶片修复;E-mail:317632838@foxmail.com

面轮廓的准确度。Ding 等^[5]分析了抛物线模型、余弦模型、圆弧模型这三种主要的单缝模型与单道焊缝的匹配度。闫岷宇等^[6]在电弧增材制造工艺参数控制中提出了单层单道半椭圆焊缝模型。Xiong 等^[7]选择气体保护金属电弧焊研究在逐层增材制造过程中单道焊缝最优的模型,通过将焊缝截面实际面积与圆弧曲线、抛物线曲线和余弦函数曲线三个模型的预测面积进行对比确定拟合焊缝截面轮廓的最佳模型。这些研究表明,选择合适的调控工艺可以合理地控制焊缝的截面几何形状。然而,微束等离子焊接在修复航空发动机叶片截面过程中,存在多道焊缝动态重叠,生成的多道焊缝截面几何形状将随着焊缝动态变化由平行重叠变为转角重叠。同时随着焊缝层数的增加,多道焊缝在转角重叠区域产生的尺寸误差将逐层累积,导致焊接面在高度上有显著的尺寸误差。

本文为了对转角区域的焊缝生成进行控制,采用了以抛物线函数拟合的单道焊缝模型,推导建立了转角区域工艺参数控制焊缝成型的模型。

1 基于抛物线拟合的单道焊缝模型

单道焊缝截面如图 1 所示。由于单缝形状对焊缝尺寸影响非常大,因此单缝模型的适应度将对整个焊缝质量产生至关重要的影响。此外,在焊接多道焊缝中单道焊缝模型的选择也将直接影响焊缝成形质量。

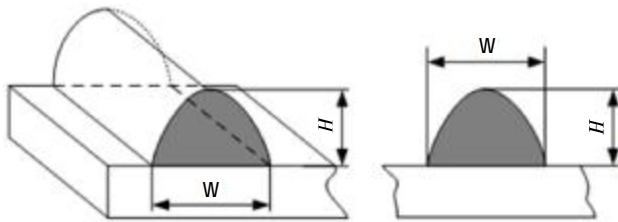


图 1 单道焊缝截面图
Fig.1 Section diagram of single pass weld

目前,描述单道焊缝截面形状模型大多是采用测量的实际焊缝熔高和焊缝熔宽与模型预测的焊缝熔高和熔宽对比来计算模型误差,而不是采用完整的截面轮廓面积进行对比计算,这导致这些模型预测的焊缝横截面积相对误差高。因此,基于曲线拟合方法建立的单道焊缝模型需要详细对比焊缝的横截面积才能实现焊缝几何形状的精确建模。本文选用抛物线模型研究单道焊缝模型,并在实验中验证该模型的实际误差。

为了使微束等离子焊接过程更加稳定,焊接行程按照规划路径进行,保证焊接过程中工艺参数不变、熔滴稳定、焊缝成形均匀。在单位时间内焊丝熔化的体积速率 dv/dt 为:

$$\frac{dv}{dt} = U_1 = V_s \cdot S_w = V_s \cdot \frac{\pi D_w^2}{4} \quad (1)$$

式中: D_w 为焊丝直径; V_s 为送丝速度; S_w 为焊丝截面积; U_1 为单位时间内焊丝的熔化体积。

在单位时间内熔池凝固的体积速率 dv/dt 可以表示为:

$$\frac{dv}{dt} = U_2 = V_f \cdot S_d \quad (2)$$

式中: V_f 为焊接速度; S_d 为焊缝截面积; U_2 为单位时间内熔池的凝固体积。

由于整个焊接过程处于稳定焊接,从焊丝熔化成为熔滴、到焊枪滴下熔滴在基板上形成熔池,最后凝固为焊缝的整个过程中损失的材料可以忽略不计,因此单位时间内焊丝熔化体积等于熔池凝固体积。

$$U_1 = U_2 = V_s \cdot \frac{\pi D_w^2}{4} = V_f \cdot S_d \quad (3)$$

进一步推出:

$$S_d = \frac{V_s \pi D_w^2}{4 V_f} \quad (4)$$

根据式(4)得到对微束等离子焊接控制焊缝形成过程影响最大的两个工艺参数是送丝速度和焊接速度。为了定量计算抛物线模型误差,定义抛物线模型预测面积与实际截面积的相对误差为 E :

$$E = \frac{A_p - A_a}{A_a} \times 100\% \quad (5)$$

式中: A_p 为抛物线模型预测截面积; A_a 为单位长度内实际焊接截面积。

抛物线模型在直角坐标系中如图 2 所示。抛物线过三个特殊点 $(-W/2, 0)$, $(0, H)$, $(W/2, 0)$, 焊缝宽度与高度关系为:

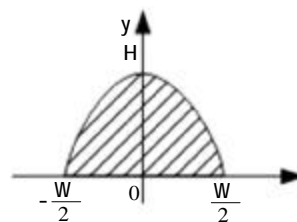


图 2 抛物线模型图
Fig.2 Drawing of parabolic model

$$\begin{cases} H=aW^2+c \\ (W=0, H=c) \\ (W=\pm\sqrt{-\frac{c}{a}}, H=0) \end{cases} \quad (6)$$

式中: a, c 为常数。利用抛物线模型计算截面积, 得:

$$A_p = \int_{-W/2}^{W/2} HdW = \frac{4c}{3} \sqrt{-\frac{c}{a}} \quad (7)$$

焊接过程中真实截面积根据式(4)可得:

$$A_a = S_d = \frac{V_s \pi D_w^2}{4V_f} \quad (8)$$

2 转角焊缝模型

当多道焊缝在基板上并行重叠时焊缝截面如图3所示。相邻焊缝之间的中心距离 d 对焊缝重叠区域的表面质量有着重要影响。当中心距离 d 大于单道焊缝熔宽 W 时, 相邻的两道焊缝将不会重叠; 随着中心距离 d 的减小, 相邻两道焊缝将产生重叠并出现图3中的重叠区域和塌陷区域, 并且重叠区域面积随着中心距离 d 的减小而增大。随着中心距离 d 减小到一定值 d^* 时, 塌陷区域与重叠区域面积相等, 此时重叠焊缝的表面将在理论上成为平面。本文采用 $d^*=0.667W$ 作为相邻焊道中心距离, 并将此中心距作为转角焊缝模型起始点。在此中心距离下, 单位时间内所形成焊缝的体积如下:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{V_s \pi D_w^2}{4} = \frac{2WH}{3} V_f \quad (9)$$

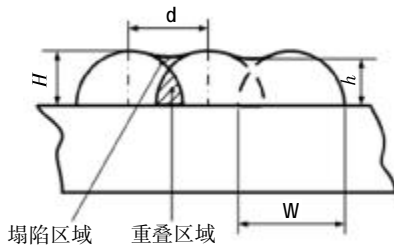


图3 多道焊缝重叠模型
Fig.3 Multi-pass weld overlap model

在微束等离子焊接修复沿路径行进时, 转角区域情况如图4所示。转角焊缝路径分为接近转角点 O_1 阶段和远离转角点 O_1 阶段, 在接近转角点 O_1 阶段相邻焊缝中心距离 d 逐渐减小, 焊缝参与重叠区域的横截面面积越来越大; 在转角点 O_1 处双缝之间中心距为0, 双缝完全重叠导致焊缝整个横截面参与重叠; 在远离转角点 O_1 阶段, 相邻焊缝中心距离 d 逐渐增大, 单缝参与重叠区域的横截面面积越来越小, 直到相邻焊缝中心距 d 大于 d^* , 焊缝将退出转

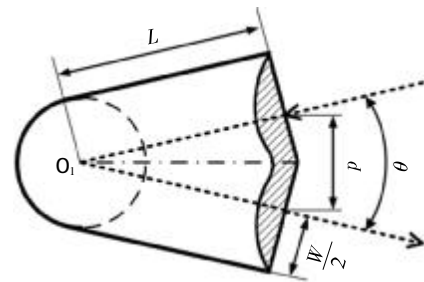


图4 转角区域行进路线
Fig.4 Route in corner area

角模型区域。

当双缝中心距 $d^*=0.667W$ 焊缝横截面重叠情况如图5所示(彩图见电子版)。焊缝转角重叠区域分别由蓝色和红色两道焊缝构成, 将蓝色和红色焊缝沿各自中心线可再分为左右两个部分。以蓝色焊缝为例, 蓝色焊缝中心线左侧部分满足抛物线模型, 不参与重叠; 蓝色焊缝中心线右侧部分参与重叠, 且右侧塌陷区域与重叠区域面积相等, 因此在模型计算时将右侧重叠部分看作矩形平面。

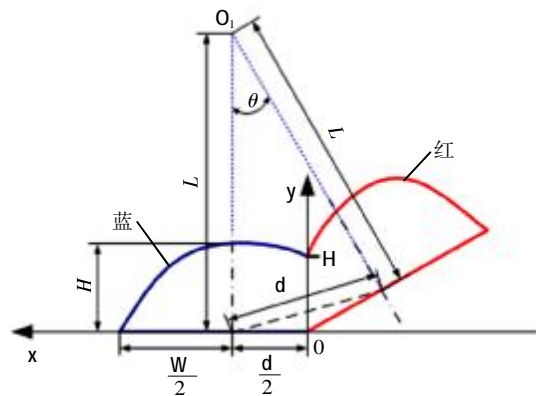


图5 焊缝转角截面重叠模型
Fig.5 Overlap model of weld corner section

将转角区域焊缝分为抛物线模型和矩形平面两部分计算:

$$y = \begin{cases} ax^2+c & \frac{d}{2} \leq x \leq \frac{d}{2} + \frac{W}{2} \\ H & 0 \leq x \leq \frac{d}{2} \end{cases} \quad (10)$$

单道焊缝此时的横截面面积为:

$$A_p = \int_0^{\frac{W}{2} + \frac{d}{2}} y dx = \frac{1}{3} WH + HL \tan \frac{\theta}{2} \quad (11)$$

式中: L 为端面横截面到转角点 O_1 的距离, L 随着远离转角点 O_1 而增大, 在相邻两道焊缝中心距达到 d^* 时 L 有最大值 $L_m = \frac{d^*}{2 \sin \frac{\theta}{2}}$; L 随着接近转角点 O_1 而

减小,在转角处 L 有最小值 0 。 θ 为两焊缝转角角度,随着 θ 值增大, L_m 减小,转角区域长度减小,宽度增加。研究发现当 $\theta=60^\circ$ 时转角区域的转角高度误差较小,因此本文转角区域角度采用 60° 。

为了推导转角区域任意点焊接速度与中心距等于 d^* 焊接点焊接速度的关系,令 d^* 焊接点焊接速度为 V_{f1} ,转角区域某一位置焊接速度为 V_{f2} ,重叠区域单位时间内所沉积的体积为:

$$\frac{dv}{dt} = \begin{cases} \frac{2WH}{3} V_{f1} & d=d^* \\ \frac{2WH}{3} V_{f2} \left[\frac{1}{2} + \frac{3L \tan(\theta/2)}{2W} \right] & d < d^* \end{cases} \quad (12)$$

式(12)表明任意位置焊接速度与焊缝熔高、焊缝熔宽、 d^* 焊接点焊接速度和转角角度有关,而抛物线模型中焊丝直径和送丝速度决定了焊缝熔高与熔宽。因此重叠区域单位时间内沉积体积由焊丝熔化体积、送丝速度和焊接速度决定,其中焊丝直径影响焊丝熔化体积的这一影响因素在实验开展前就已经确定,可认为是不变因素;焊接速度由焊接机器人控制,相对于送丝速度具有更高的精度,且送丝速度在单位时间内熔化体积不变的前提下数值是不变的。

转角区域任意点焊接速度是通过与中心距等于 d^* 焊接点的焊接速度对比推导而来的,因此选择中心距等于 d^* 焊接点的焊接速度 V_{f1} 作为转角模型起始点的转角焊接速度。在满足整个焊接过程中单位时间内焊缝体积的一致性条件下,式(12)被进一步整理为:

$$V_{f2} = \frac{2W}{W+3L \tan(\theta/2)} V_{f1} \quad (13)$$

可以看出转角区域的焊接速度 V_{f2} 随着横截面离转角点 O_1 的距离变化而变化,当瞬时横截面与转角点重合时,此时转角焊接速度 V_{f2} 为起始焊接速度 V_{f1} 的一半,当瞬时横截面与转角点处于最远点即中心距等于 d^* 时,此时转角焊接速度 V_{f2} 等于起始焊接速度 V_{f1} 。

然而整个转角过程中如果没有加以控制,则整个转角过程中都将以进入时的起始焊接速度 V_{f1} 做焊接运动,这样将导致在转角过程中特别是转角点 O_1 处过多熔滴进入熔池,形成的焊缝将会发生凸起。因此需要对转角过程进行工艺控制,求得的转角实时速度与起始焊接速度 V_{f1} 之间的控制工艺为:

$$\begin{cases} V_{f2} = \frac{2W}{W+3(L_m - V_{f1}t) \tan(\theta/2)} V_{f1} \\ V_{f2} = \frac{2W}{W+3(V_{f1}t) \tan(\theta/2)} V_{f1} \end{cases} \quad (14)$$

在微束等离子焊接转角区域过程中,控制工艺将决定焊缝在转角区域的表面质量和尺寸精度,以起始焊接速度作为转角控制速度的控制方法,根据式(14)建立转角区域的工艺参数调控方法,实时对比焊接位置调整焊接过程中的送丝速度和焊接速度。

3 实验

3.1 实验条件

微束等离子焊接实验平台主要由焊接电源、控制系统以及运动主体三部分组成。焊接电源选择了有程序控制的 Fronius 焊接设备,搭配 0.8 mm 的 Inconel718 焊丝,保护气体选择 $95\% \text{ Ar}$ 和 $5\% \text{ CO}_2$ 的混合气体,气体流速设置为 20 L/min ;运动主体选择 CNC 五轴运动系统,焊枪安装于框架上部,通过极轴的旋转、极径的进给带动焊枪运动,在焊枪旁边固定有 $1280(\text{H}) \times 1024(\text{V})$ 分辨率的 XVC-1000 相机拍摄焊缝情况;控制系统由工控机、运动控制卡和驱动器等组成,在上位机界面可以实现程序的写入、焊接参数的修改与坐标点标定等一系列控制。

3.2 单道焊缝实验

在 8 mm 厚度的 Inconel718 镍基合金板上进行微束等离子堆焊。由于单缝模型中主要影响参数为焊接速度和送丝速度,因此在焊接实验中选择了电流 11 A 、电压 20 V 、气体流速 0.3 L/min 作为不变参数,通过调整焊接速度和送丝速度进行实验,参数见表 1。不同焊接速度和送丝速度下单道焊缝成形如图 6 所示。

表 1 单道焊缝实验结果
Tab.1 Experimental data of single pass weld

序号	焊接速度 ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	送丝速度 ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	焊缝熔高 /mm	焊缝熔宽 /mm	面积误差 (%)
1	1.2	4.0	1.119	2.228	0.79
2	1.3	4.3	1.102	2.274	0.48
3	1.0	4.3	1.273	2.522	0.98
4	1.4	3.4	0.955	1.897	1.08
5	1.3	3.7	1.032	2.047	1.54
6	1.3	4.2	1.025	2.412	0.27

为了计算抛物线曲线拟合焊缝截面轮廓的面积误差,测量不同送丝速度和焊接速度条件下单道焊缝的熔高和熔宽,利用抛物线模型对比实际截面积,获得表 1 的结果。

实验结果显示单缝抛物线模型的误差均在 2%

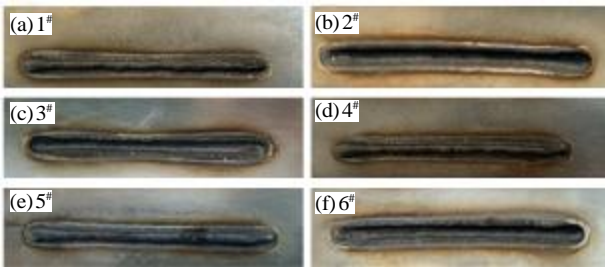


图6 单道焊缝成形
Fig.6 Single pass weld forming

以内,证明了抛物线模型在拟合单道焊缝时有相当高的精度,能够满足表征单道焊缝截面的特征。

3.3 转角焊缝生成实验

实验过程中焊接区域从双缝中心距等于 d^* 的转角起始点开始,此时到转角点 O_1 的距离为 L ,沿着路径行进到转角点 O_1 后转角 60° 继续行进直至转角区域焊接完成。为了对比分析转角焊缝模型的有效性,在焊接过程中采用 4.2 mm/s 送丝速度和 1.3 mm/s 焊接速度的参数恒定控制转角区域,对形成的焊缝分别测量转角起始位置、距离起始位置 $L/3$ 、 $2L/3$ 处和转角点 O_1 处的重叠焊缝截面几何结构,如图7所示。在整个转角区域中,转角起始点的重叠区域面积最小、重叠高度最低,随着焊接接近转角点焊缝的重叠区域逐渐增加,重叠高度逐渐增高,焊缝凸起程度也随之增大,在转角点 O_1 达到最大。

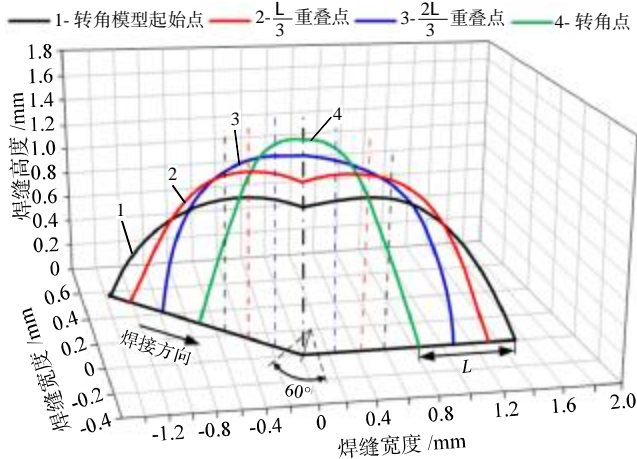


图7 不同位置的焊缝重叠截面图
($V_f=1.3\text{ mm/s}$, $V_s=4.2\text{ mm/s}$)
Fig.7 Overlap sections of welds at different positions
($V_f=1.3\text{ mm/s}$, $V_s=4.2\text{ mm/s}$)

为了对比检验本文所提出的转角焊缝模型,转角区域焊接起始点仍采用 4.2 mm/s 送丝速度和 1.3 mm/s 焊接速度,但转角过程中工艺参数按转角焊缝模型进行变化控制。同时为进一步验证模型准确性,

还进行了双层堆叠。采用转角焊缝模型形成的焊缝如图8所示。在第二层堆叠过程中,发现与第一次焊缝成形尺寸趋势一致但两层重叠后高度并不是单层高度的两倍,这是由于第二层焊缝存在一定的塌陷,并不能完全重叠在第一层焊缝上。实验结果显示,一定的塌陷对焊缝重叠趋势影响很小,对焊缝高度上的误差可以忽略不计。



图8 采用转角焊缝模型控制形成的焊缝
Fig.8 Weld forming by using the fillet weld model

为了进一步量化模型误差,对转角重叠高度误差 e_c 进行定义:

$$e_c = \frac{|H_x - H|}{H} \times 100\% \quad (15)$$

式中: H 为转角模型起始点焊缝熔高; H_x 为测量点的焊缝重叠高度。

通过对转角焊缝模型选择测量点和转角重叠误差计算,得到如图9所示的误差图。通过误差图可以直观地发现,使用 4.2 mm/s 送丝速度和 1.3 mm/s 焊接速度的恒定工艺控制下,转角区域的转角点单、双层误差在75%以上;焊接起始点仍采用 4.2 mm/s 送丝速度和 1.3 mm/s 焊接速度,但转角过程中使用本文的转角焊缝模型工艺控制,转角区域转角点焊缝单双层误差在30%以下,证明了所提出的转角焊缝模型的准确性。

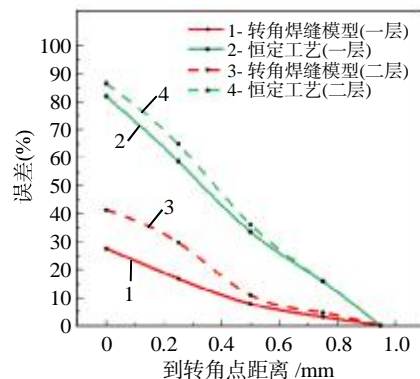


图9 两种工艺控制方法的转角重叠高度误差
Fig.9 Overlap height error of the fillet weld under the two process control methods

4 结论

(1) 利用抛物线曲线拟合单道焊缝截面轮廓,建立了单道焊缝工艺模型,实现了对单道焊缝截面的几何形状控制。

(2) 提出了控制工艺参数的转角焊缝模型,实现了对转角区域焊缝形状的控制,减少了转角焊缝的凸起情况。

(3) 利用微束等离子焊接实验平台,完成了单道焊缝、转角焊缝模型实验。单道焊缝实验验证了抛物线拟合误差,证明了单道焊缝模型的准确性;转角焊缝模型实验中,通过对比恒定工艺与转角焊缝工艺,结果表明转角焊缝模型控制下转角区域特别是转角点焊缝凸起误差下降较大,能满足修复要求。

参考文献:

[1] Nal T, Gahn L, Kittel J, et al. Process development for tip

repair of complex shaped turbine blades with IN718[J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 47: 1050-1057.


[2] 周祯童,周建平,许燕. 基于 GMAW 堆焊成型的焊缝模型及搭接量研究[J]. *热加工工艺*, 2022, 51(17): 135-139.

[3] Cao Yong, Zhu Sheng, Liang Xiubing, et al. Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic MAG welding process [J]. *Robot Computer Integrated Manufacturing*, 2010, 27(3): 641-645.

[4] 刘理想,柏兴旺,周祥曼,等. 电弧增材制造多层单道堆积的焊道轮廓模型函数[J]. *焊接学报*, 2020, 41(6): 24-29.

[5] Ding Donghong, Pan Zengxi, Cuiuri D, et al. Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing [J]. *Robot Computer Integrated Manufacturing*, 2016, 39: 32-42.

[6] 闫峒宇,刘文洁,李新宇,等. 电弧增材制造焊缝建模及尺寸规律研究[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(5): 177-181.

[7] Xiong J, Zhang G J, Gao H M, 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. 

(上接第 17 页)

3 结论

(1) 铝合金钨极氩弧焊电弧区域的最大电流密度达到 $2.66 \times 10^7 \text{ A/m}^2$,关于电弧轴线对称分布,在钨极端部处洛伦兹力的最大值达到 $1.21 \times 10^5 \text{ N}$ 。在阴极斑点处,电流密度和洛伦兹力的值有大幅度增大。径向方向上,电流密度为单峰分布,洛伦兹力为双峰分布。

(2) 施加 x 正方向的横向磁场后,洛伦兹力迅速增大,钨极附近电势变化剧烈。在 x-z 平面上电弧形态不发生变化,关于 z 轴对称;在 y-z 平面上电弧发生偏转,电弧被拉长,随着磁场强度的增大,偏转角度也增大。电弧弧长增加后,电弧电势由未施加磁场时的 8.67 V 增加到外加磁场强度为 0.2 mT 时的 8.96 V。电弧温度场分布发生变化,高温区域逐渐向 y 轴负方向偏移,影响工件热输入。

参考文献:

[1] 雷正,朱宗涛,李远星,等. 空心钨极 TIG 焊电弧特性数值模拟[J]. *焊接学报*, 2021, 42(9): 9-14.

[2] 高文国,高珊,胡建岗. 外加磁场和深冷处理在铝合金焊接中的应用现状[J]. *焊接*, 2020(11): 32-36.

[3] Hu J, Tsai H L. Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The arc [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(5/6): 833-846.

[4] 周祥曼,田启华,杜义贤,等. 外加稳态磁场作用下的焊接电弧数值仿真[J]. *机械科学与技术*, 2018, 37(7): 1068-1075.

[5] 郭朝博. 脉冲 TIG 焊电弧及熔池的数值分析[D]. 兰州:兰州理工大学, 2011.

[6] Jian Xiaoxia, Wu Chuansong. Numerical analysis of the coupled arc-weld pool-keyhole behaviors in stationary plasma arc welding [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 84: 839-847. 