

DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20230070

## 基于响应曲面法的摆焊工艺参数分析

何俊杰, 郝佳鑫, 王天琪

(天津工业大学 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

**摘要:** 针对摆焊工艺中焊接参数众多,且焊缝几何参数与焊接参数之间关系难以确定的问题,本文提出了一种基于响应曲面法的摆焊工艺参数分析方法。研究了冷金属过渡焊接(CMT)摆焊工艺的摆动参数和焊枪摆动轨迹,采用响应曲面法建立了送丝速度、焊接速度、摆动幅度与焊缝高度、焊缝宽度、焊缝熔深的数学模型,并对模型有效性进行了验证。研究表明:焊枪按照摆动长度为3 mm,左右两侧侧壁停留长度为0.5 mm的摆动轨迹摆动时,焊缝不会出现“鱼刺”型咬边,成型较好,有较好的“鱼鳞纹”,符合焊接成型要求;对焊缝高度的主要影响因素依次是送丝速度>焊接速度>摆动幅度,对焊缝宽度的主要影响因素依次是摆动幅度>焊接速度>送丝速度,对焊缝熔深的主要影响因素依次是送丝速度>焊接速度>摆动幅度。本文建立的3个模型均能够在因子域内预测响应。

**关键词:** 摆焊;摆动轨迹;响应曲面法;焊缝几何特征;摆焊参数分析

中图分类号: TG444

文献标志码: A

文章编号: 1005-0299(2024)06-0010-09

## Analysis of pendulum welding process parameters based on response surface method

HE Junjie, HAO Jiixin, WANG Tianqi

(Tianjin Key Laboratory of Modern Mechatronics Equipment Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** In response to the challenge of numerous welding parameters in the swing welding process, and the difficulty on determining the relationship between geometric parameters of the weld joint and welding parameters, an analysis method of swing welding process parameters based on the response surface method is proposed. Firstly, the welding torch's swing trajectory and swing parameters in the CMT swing welding process are studied. Then, a mathematical model is established using the response surface method to correlate the wire feeding speed, welding speed, swing amplitude, weld height, weld width, and weld penetration. Moreover, the effectiveness of the model is validated through experimental verification. The research shows that when the welding torch swings with a swing length of 3 mm and stay on the sidewalls on both sides for a length of 0.5 mm, the weld joint does not show “fishbone” type undercutting and has good formation with a desirable “fish scale” pattern, which meets the welding forming requirements. The main influencing factors of weld height are wire feeding speed > welding speed > swing amplitude. The main influencing factors of weld width are identified as swing amplitude > welding speed > wire feeding speed, and the main influencing factors of weld penetration are determined to be wire feeding speed > welding speed > swing amplitude. All three models can predict responses within the factor domain.

**Keywords:** swing welding; swing trajectory; response surface method; weld geometrical features; analysis of swing welding parameters

收稿日期: 2023-03-07.

网络出版日期: 2023-09-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51975410);天津市教委科研计划项目(2019KJ011).

作者简介: 何俊杰(1973—),女,副教授.

通信作者: 王天琪, E-mail: wtq0622@163.com

期刊网址: [http://hit.alljournals.cn/mst\\_cn/ch/index.aspx](http://hit.alljournals.cn/mst_cn/ch/index.aspx)

随着石油产业、造船业、汽车行业的不断发展,在石油管道、轮船、汽车的焊接加工中,普遍存在较宽的焊缝焊接成型效果不好的问题<sup>[1-4]</sup>。目前,解决这一问题最有效的方法就是采用摆动焊接来增加焊缝宽度,典型的摆动轨迹有锯齿形、正

弦形等<sup>[5]</sup>。摆动焊接由于焊枪做有规律的摆动,能够降低焊缝能量和熔池温度防止产生焊接缺陷<sup>[6]</sup>,当摆动轨迹设置得当,还可以抵消重力部分影响,有利于提高焊接质量<sup>[7]</sup>。

影响摆焊焊缝成型的因素众多,不仅有焊接电流、焊接电压、送丝速度、焊接速度等<sup>[8-9]</sup>,摆动参数如摆动长度、摆动幅度、侧壁行走长度等<sup>[10-11]</sup>也影响着焊缝的成形质量。为了确定摆焊轨迹及摆焊参数对焊缝成型的直接影响与交互影响,本文首先采用单一变量法对摆动参数进行分析,确定焊枪摆动轨迹,然后采用响应曲面法建立送丝速度、焊接速度、摆动幅度与焊缝高度、焊缝宽度、焊缝熔深的数学模型<sup>[12-14]</sup>,分析摆焊工艺参数对焊缝形貌的交互影响,以期为自动化摆焊工艺参数的选择以及后续焊接过程中实时调整摆焊工艺参数提供依据。

## 1 实验

### 1.1 机器人焊接实验平台

摆焊实验平台主要由 ABB 工业机器人 (IRB1410) 和福尼斯 CMT 焊机 (Fronius TPS 4000CMT) 等组成,如图 1 所示。

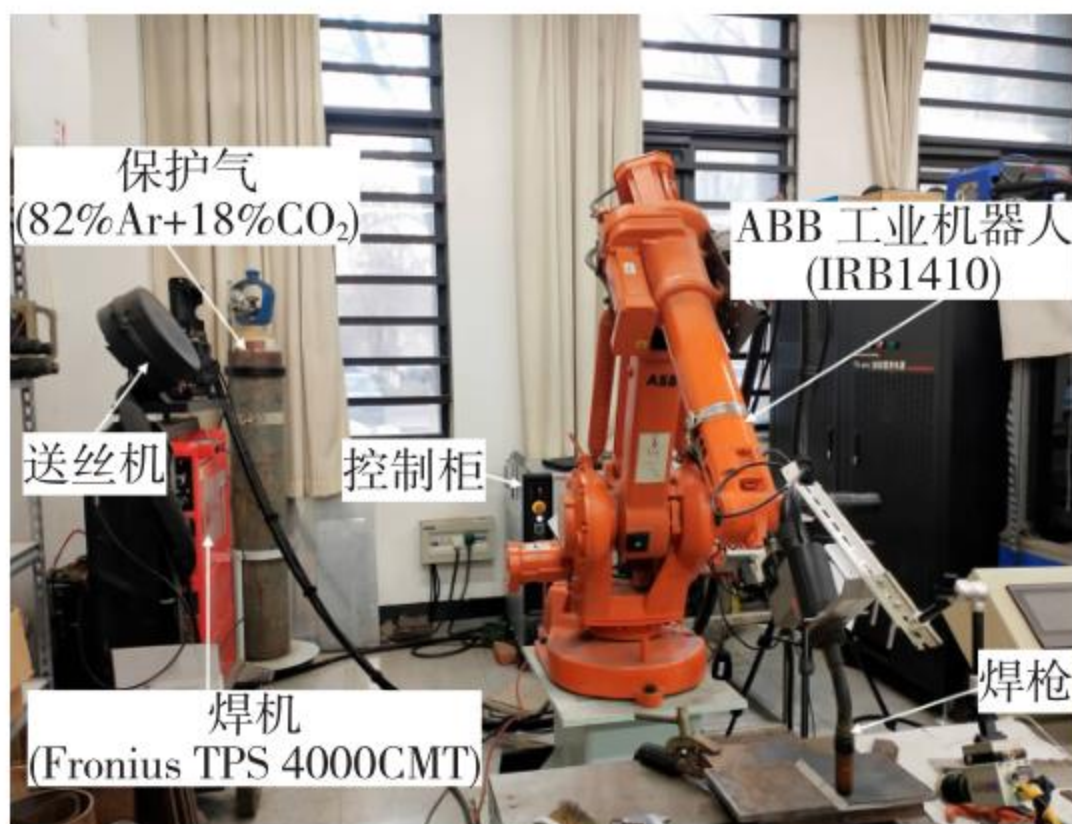


图 1 摆焊实验平台

Fig. 1 Swing welding test platform

焊接模式选取 CMT 一元化焊接,焊接母材为 3 mm 厚的低碳钢板,焊丝选用直径 1.2 mm 的 G3Si1 焊丝。焊接保护气为氩气和二氧化碳的混合气体,其质量分数占比分别为 82% 和 18%,气流量为 20 L/min。

### 1.2 摆动参数的确定

焊枪的摆动轨迹如图 2 所示,其中,  $L$  为摆动长度,  $L_1$ 、 $L_2$  分别为左右两侧侧壁行走长度,  $A$  为摆动幅度。摆动长度的选取直接影响焊缝成型是否出现“鱼刺”型咬边情况,因此对摆动长度做单一变量实验,以确定摆长的最优值。为保证焊缝成型质量美观,左右两侧侧壁停留长度应相同且不宜过大。

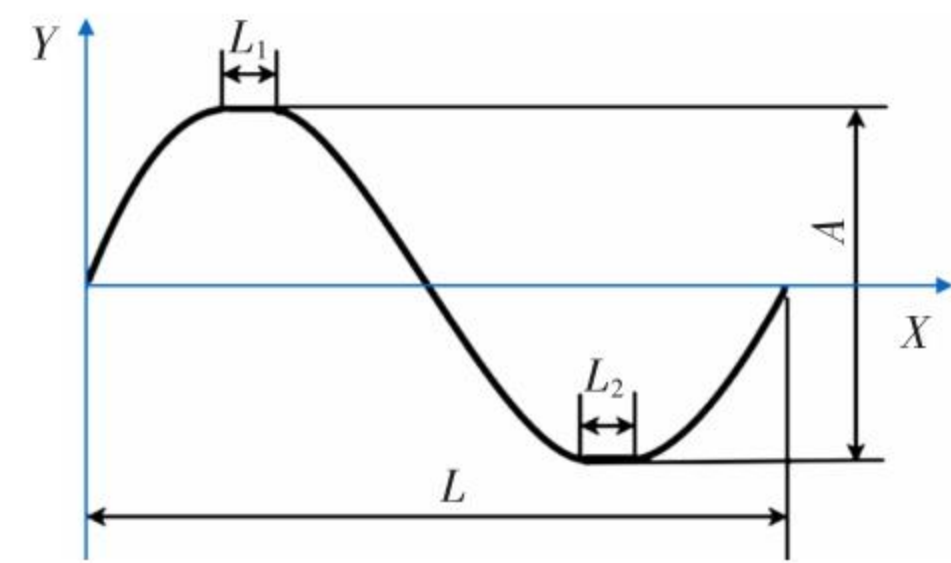


图 2 焊枪摆动轨迹示意图

Fig. 2 Schematic diagram of swing trajectory of welding torch

### 1.3 基于响应曲面法的摆焊实验设计

由于焊接模式采取 CMT 一元化焊接,焊接电流、焊接电压和送丝速度三者相互关联,调整一个参数即可,因此选取送丝速度为其中一个因素,另外两个因素为焊接速度和摆动幅度。

采用响应曲面法设计三因素三水平的 Box-Behnken design (BBD) 实验方案,设计流程如图 3 所示,根据设计流程建立数学模型,分析摆焊参数对焊缝形貌的直接影响与交互影响。所选的试验因素及水平如表 1 所示。

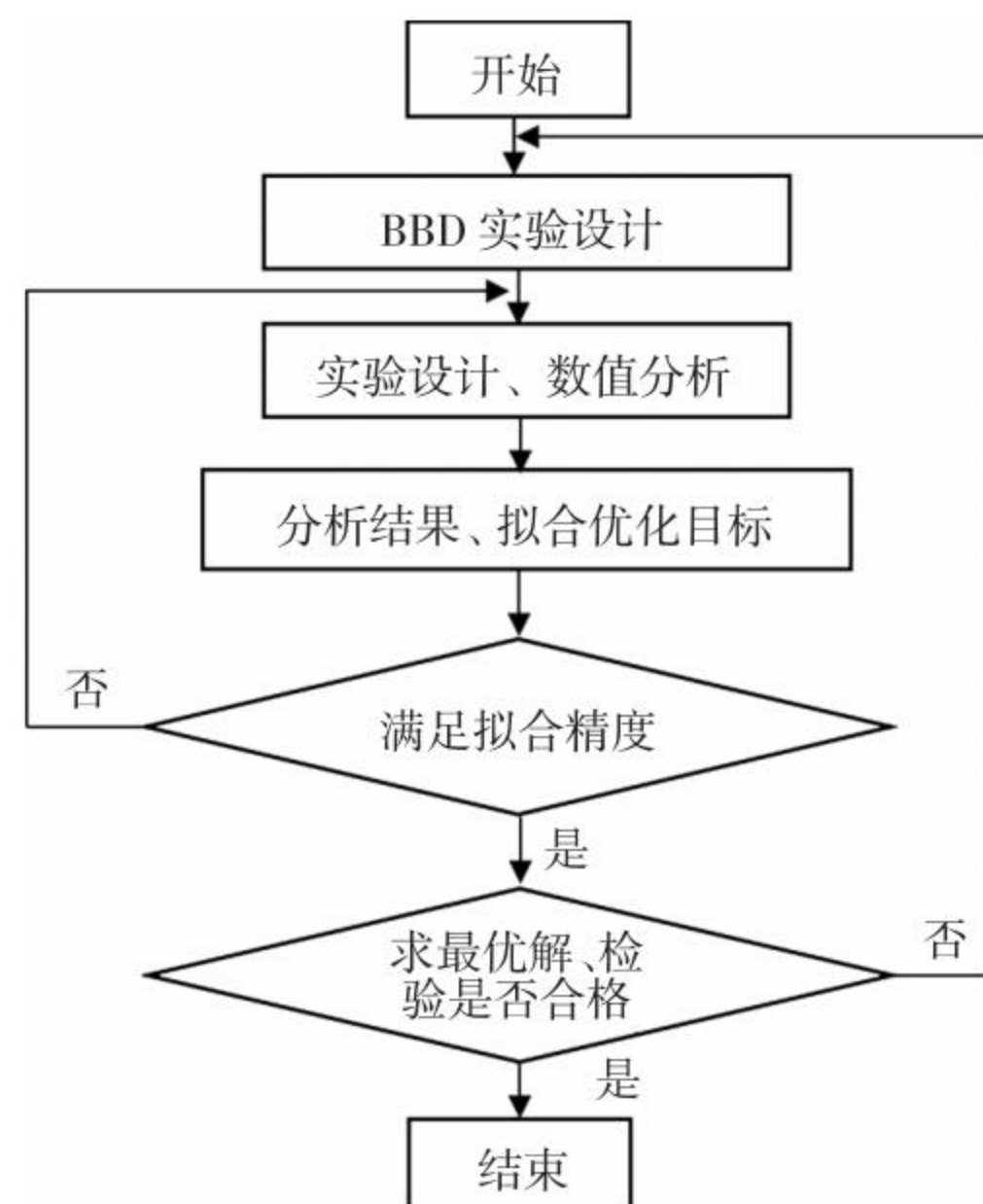


图 3 BBD 响应曲面法设计流程

Fig. 3 BBD response surface method design flow

表 1 BBD 试验变量因素及水平

Table 1 BBD experimental variable factors and levels

因素水平	送丝速度, $v_f / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	焊接速度, $v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	摆动幅度, $A / \text{mm}$
-1	3.5	3	6
0	4.5	6	12
1	5.5	9	18

## 2 结果及分析

### 2.1 摆焊轨迹的确定

在控制单一变量下,得到不同摆动长度的焊

缝宏观图像,如图 4 所示,其中送丝速度为 4.5 m/min,焊接速度为 6 mm/s,摆动幅度为 7 mm,焊丝干伸长选取为焊丝直径的 10 倍。

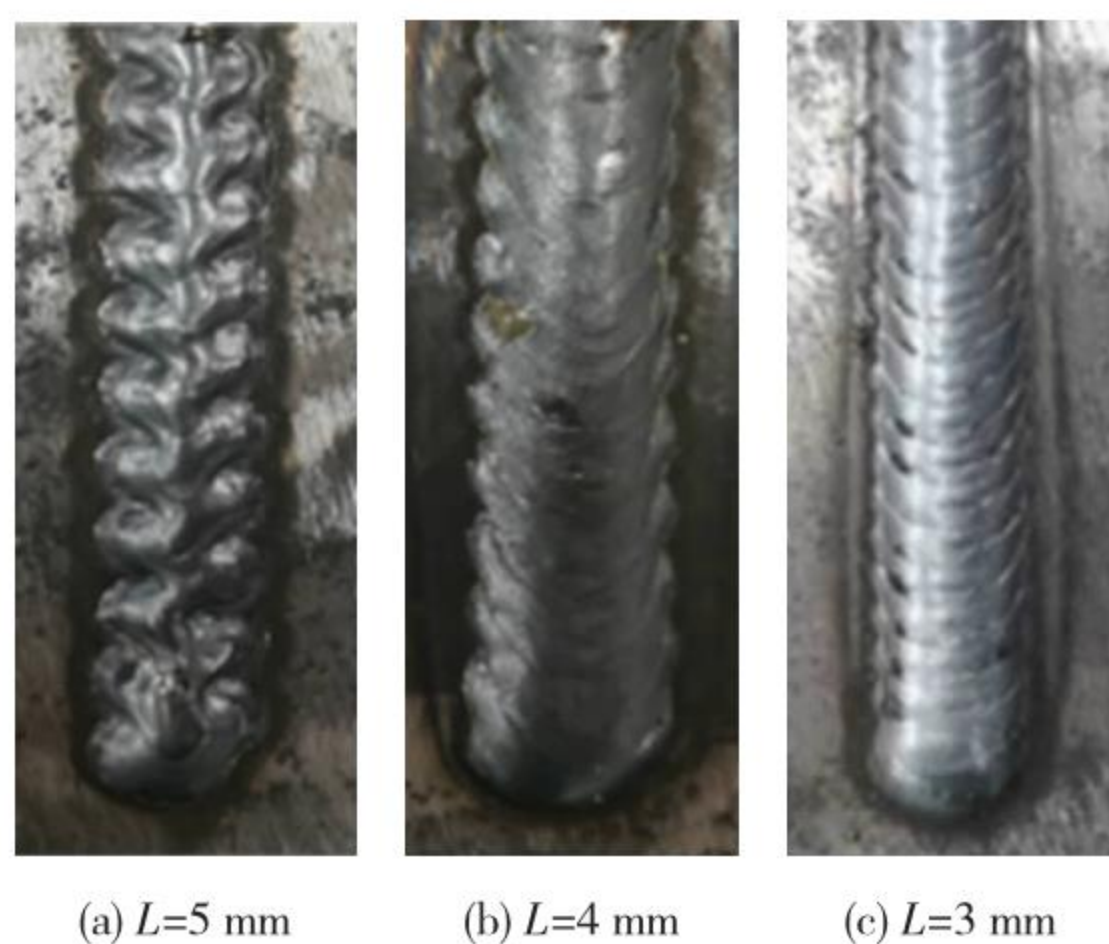


图 4 不同摆动长度的焊缝宏观图像

Fig. 4 Macroscopic image of weld beads with different swing lengths

由图 4 可知,随着摆动长度减小,焊缝“鱼刺”型咬边效果逐渐减弱,因此在较宽焊缝焊接时,摆动长度不易过大,应小于 4 mm。当摆动长度为 3 mm 时,焊缝能够得到较好的“鱼鳞纹”,成型质量满足焊接要求。

一个周期的摆动长度为 3 mm 时,当左右两侧侧壁停留长度取 0.5 mm,如图 5 所示,则焊枪在一个周期内每段水平行走的距离都是相同的,均为 0.5 mm。这可保证焊缝的均匀性和对称性,成型质量更好。

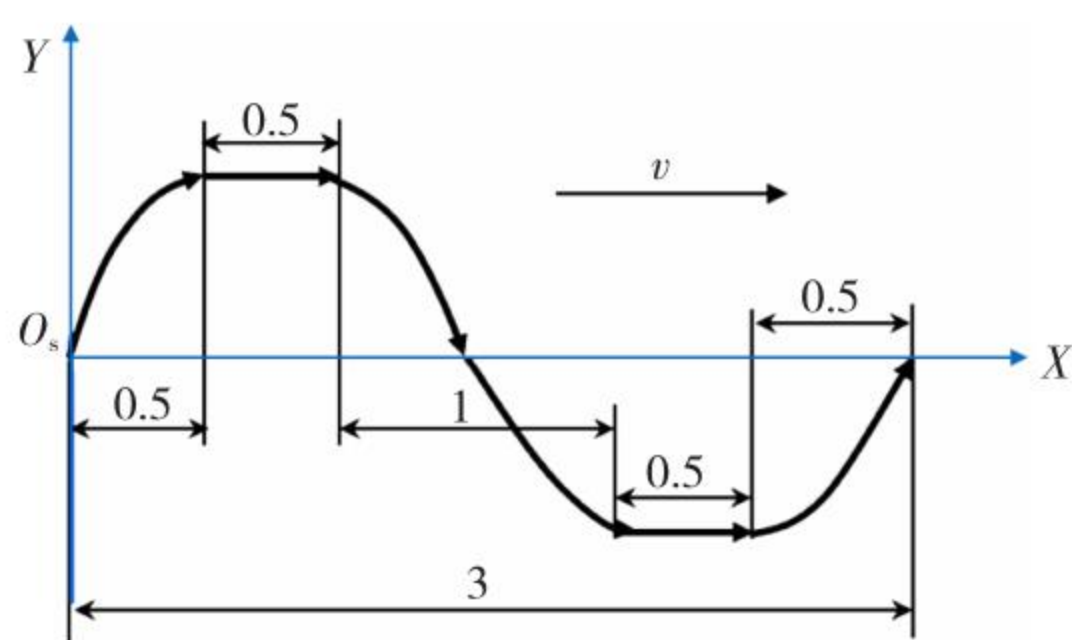


图 5 摆焊轨迹(单位:mm)

Fig. 5 Swing welding trajectory

## 2.2 焊缝几何特征

按照 BBD 三因素三水平进行实验设计后,采用图 5 所示的摆焊轨迹依次进行 17 组实验,得到相应的焊缝并对其切块、打磨、抛光、腐蚀。

采用 3 个响应值表征焊缝形貌,分别为焊缝高度  $H$ 、焊缝宽度  $W$  和焊缝熔深  $D$ ,如图 6 所示,并对每个响应值分别进行 5 次测量取平均值,所得数据如表 2 所示。

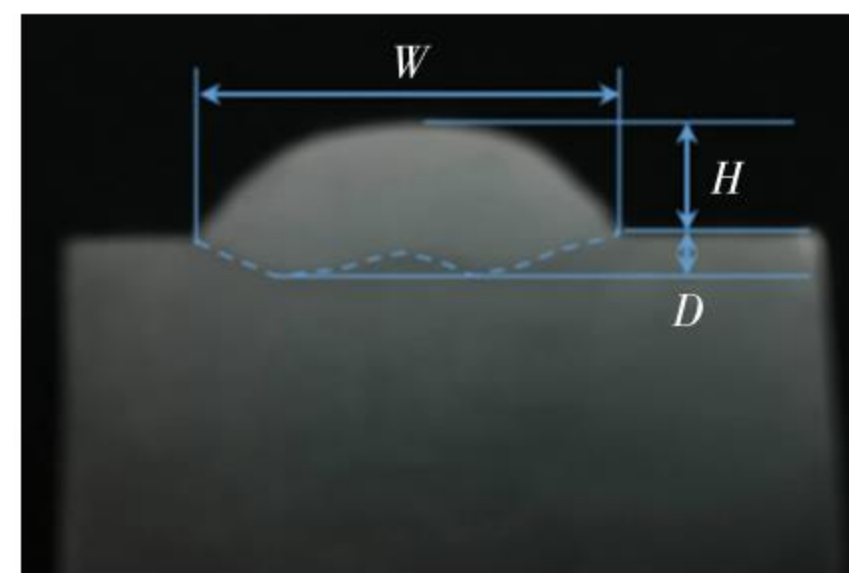


图 6 焊缝宏观形貌

Fig. 6 Macro topography of weld

表 2 BBD 实验设计方案与实验数据

Table 2 BBD experimental design protocol and experimental data

实验顺序	送丝速度, $v_f / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	焊接速度, $v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	摆动幅度, $A / \text{mm}$	焊缝高度, $H / \text{mm}$	焊缝宽度, $W / \text{mm}$	熔深, $D / \text{mm}$
1	5.50	9.00	12.00	2.36	14.92	1.95
2	4.50	6.00	12.00	2.20	14.12	1.85
3	4.50	9.00	6.00	1.75	6.96	1.51
4	5.50	6.00	6.00	1.90	9.72	1.71
5	4.50	6.00	12.00	2.35	14.06	1.97
6	5.50	6.00	18.00	1.42	21.14	1.27
7	4.50	3.00	6.00	3.04	11.02	2.36
8	5.50	3.00	12.00	2.54	16.94	2.16
9	3.50	9.00	12.00	1.82	14.68	1.43
10	3.50	3.00	12.00	1.64	16.18	1.64
11	3.50	6.00	6.00	1.36	8.10	0.94
12	4.50	6.00	12.00	1.95	13.40	1.83
13	3.50	6.00	18.00	0.92	20.62	0.71
14	4.50	9.00	18.00	1.38	19.80	1.10
15	4.50	6.00	12.00	2.12	13.74	1.84
16	4.50	6.00	12.00	2.40	13.38	2.12
17	4.50	3.00	18.00	2.26	20.70	1.89

## 2.3 摆焊参数对焊缝高度的影响

利用 Design-Expert 8 软件对焊缝高度模型进行方差分析,结果如表 3 所示,可以发现各因素与焊缝高度之间存在多元二次回归响应面模型,焊缝高度关于各因素实际值的回归方程为

$$H = -7.32469 + 4.20675v_f - 0.41942v + 0.19238A - 0.03v_f \cdot v - 1.66667 \times 10^{-3}v_f \cdot A + 5.69444 \times 10^{-3}v \cdot A - 0.41075v_f^2 + 0.032972v^2 - 0.010924A^2$$

若模型的  $P$  值小于 0.05,则表示该模型是显著的<sup>[15]</sup>。由表 3 可知,模型的  $P$  值为 0.045 3 是显著的,失拟度为 0.054 5 是不显著的,表示回归方程拟合度较好,模型有效。图 7 为焊缝高度模

型的残差正态概率分布图,可见数据点基本位于直线上,说明该模型能够较准确的预测响应值。

表3 焊缝高度模型的方差分析

Table 3 Variance analysis of weld height models

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值	显著性
模型	3.67	9	0.41	3.83	0.045 3	显著
$v_f$	0.77	1	0.77	7.21	0.031 3	
$v$	0.59	1	0.59	5.52	0.051 1	
$A$	0.54	1	0.54	5.02	0.060 0	
$v_f \cdot v$	0.032	1	0.032	0.30	0.598 7	
$v_f \cdot A$	0.000 4	1	0.000 4	0.003 751	0.952 9	
$v \cdot A$	0.042	1	0.042	0.39	0.550 1	
$v_f^2$	0.71	1	0.71	6.66	0.036 4	
$v^2$	0.37	1	0.37	3.48	0.104 5	
$A^2$	0.65	1	0.65	6.11	0.042 8	
残差	0.75	7	0.11			
失拟度	0.62	3	0.21	6.25	0.054 5	不显著
纯误差	0.13	4	0.033			
总和	4.42	16				

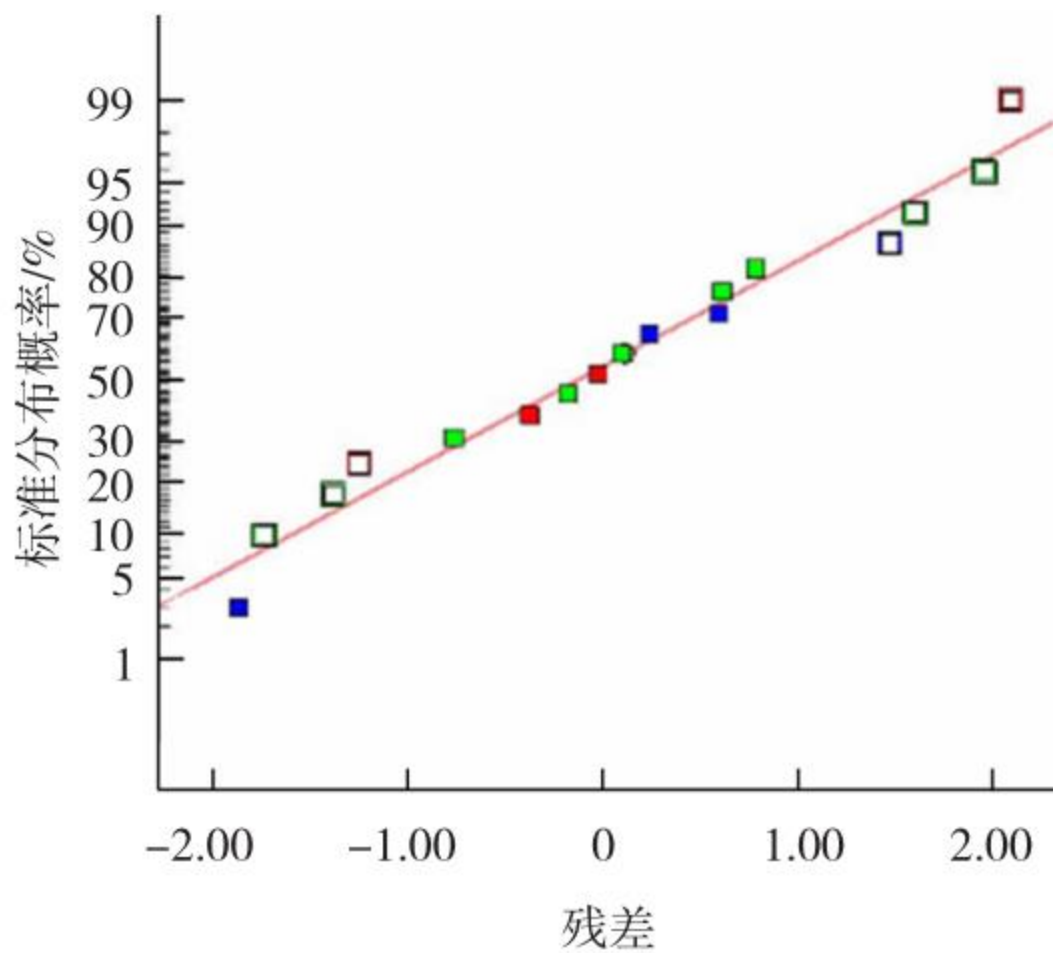
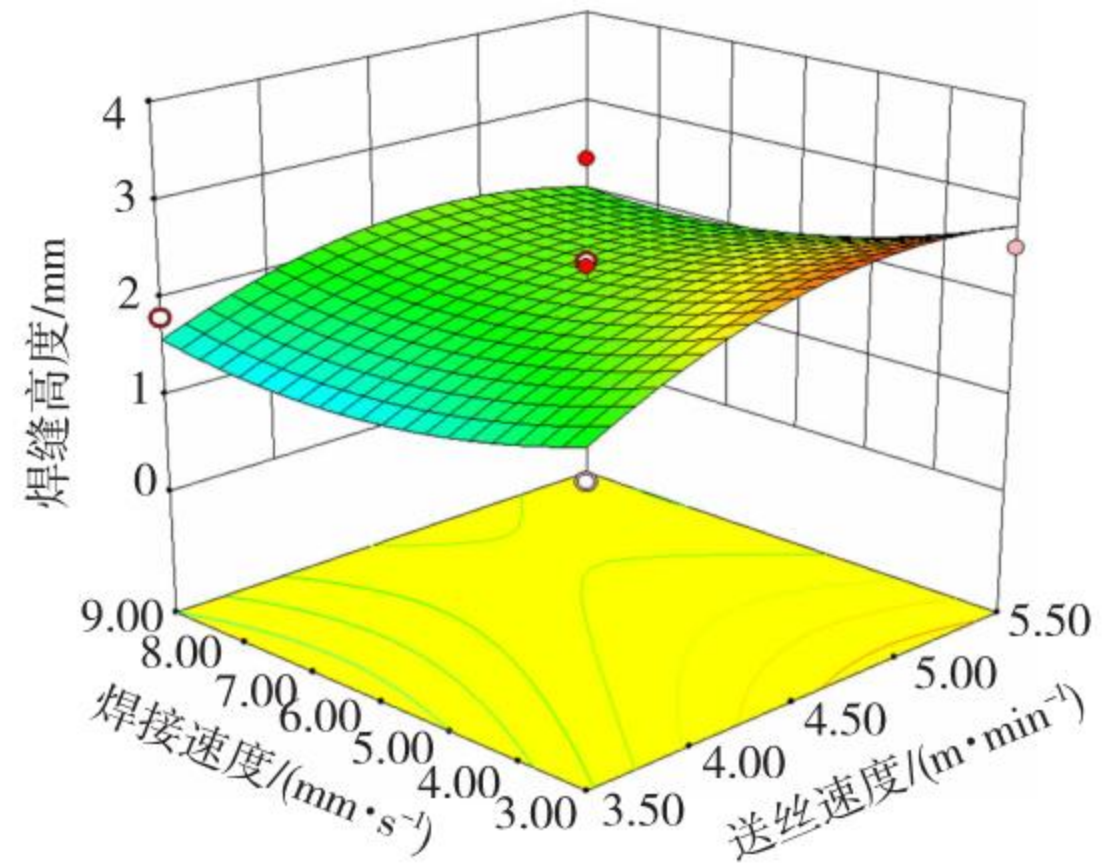


图7 焊缝高度残差分布图

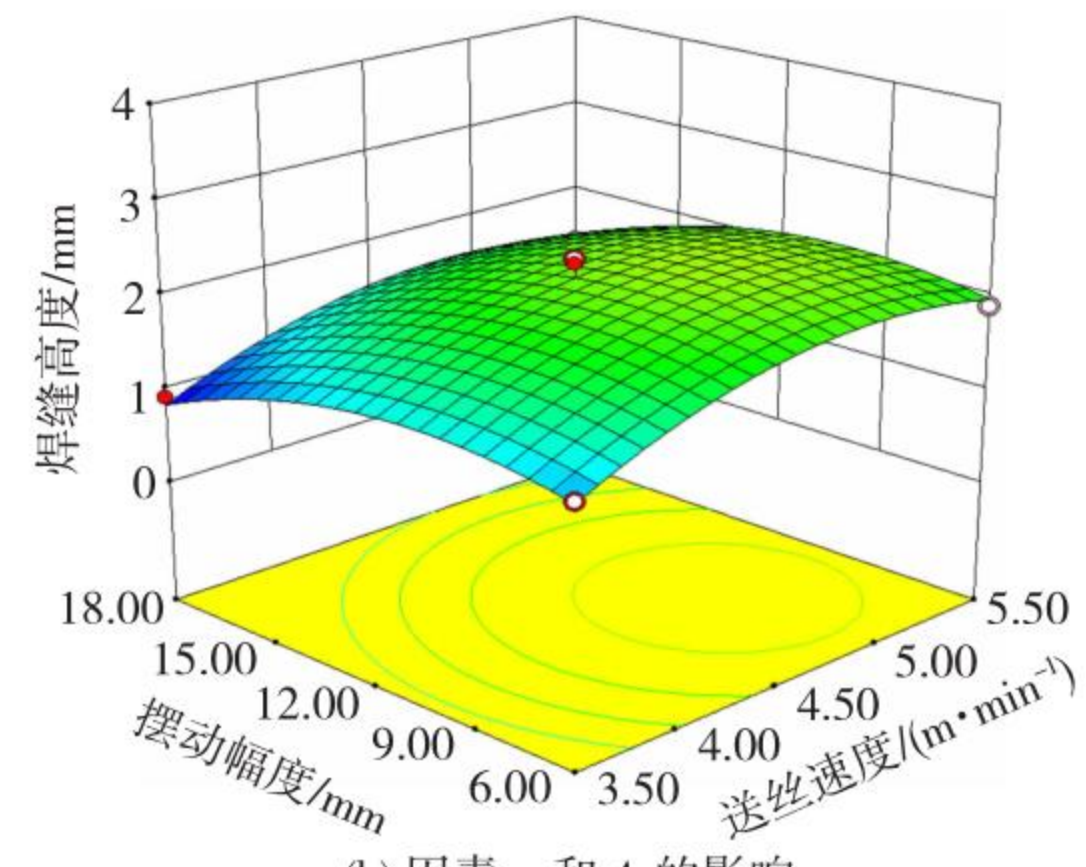
Fig. 7 Weld height residual distribution plot

图8(a)是摆动幅度不变,焊接速度与送丝速度对焊缝高度的交互影响,可以看出:焊接速度与焊缝高度成负相关,是由于焊接速度增加,热输入减小导致焊缝高度减小;送丝速度与焊缝高度成正相关,是由于送丝速度增加时,焊丝熔化量增加导致焊缝高度增加。当焊接速度分别为3,9 mm/s时,送丝速度从3.5 m/min增加到5.5 m/min,焊缝高度分别从1.82 mm增加到2.56 mm和从1.64 mm增加到2.36 mm,增加幅度分别为28.91%和30.51%;当送丝速度分别为3.5,5.5 m/min时,焊接速度从3 mm/s增加到9 mm/s,焊缝高度分别从1.82 mm降低到1.64 mm和从2.54 mm降低到2.36 mm,降低幅度分别为

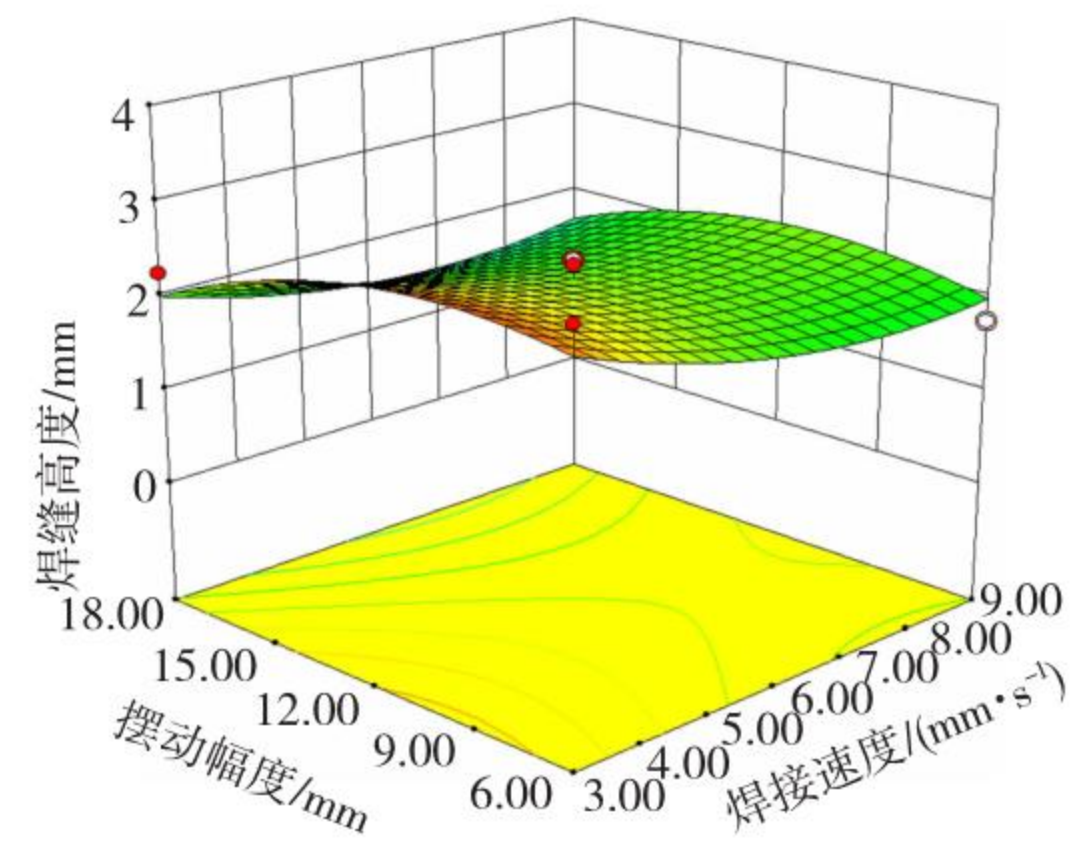
9.89%和8.66%。响应曲面在送丝速度方向的变化大于焊接速度方向,表明送丝速度对焊缝高度的影响大于焊接速度。



(a) 因素  $v_f$  和  $v$  的影响



(b) 因素  $v_f$  和  $A$  的影响



(c) 因素  $v$  和  $A$  的影响

图8 各因素对焊缝高度影响的响应曲面

Fig. 8 Response surface for the influence of each factor on the height of the weld: (a) influence of factors  $v_f$  and  $v$ ; (b) influence of factors  $v_f$  and  $A$ ; (c) influence of factors  $v$  and  $A$

图8(b)是焊接速度不变,送丝速度与摆动幅度对焊缝高度的交互影响。由图8(b)可以看出:摆动幅度与焊缝高度成负相关,是由于摆动幅度增加,焊丝熔化量不变,热输入不变而焊丝熔覆的面积加大导致焊缝高度减小但影响不显著。当摆动幅度分别为6,18 mm时,送丝速度从3.5 m/min增加到5.5 m/min,焊缝高度增加幅度分别为28.42%和35.21%;当送丝速度分别为3.5,

5.5 m/min时,摆动幅度从 6 mm 增加到 18 mm,焊缝高度降低幅度分别为 25.26% 和 32.35%。响应曲面在送丝速度方向的变化大于摆动幅度方向,表明送丝速度对焊缝高度的影响大于摆动幅度。

图 8(c)是送丝速度不变,焊接速度与摆动幅度对焊缝高度的交互影响,可以看到:当摆动幅度分别为 6,18 mm 时,焊接速度从 3 mm/s 增加到 9 mm/s,焊缝高度降低幅度分别为 42.43% 和 38.94%;当焊接速度分别为 3,9 mm/s 时,摆动幅度从 6 mm 增加到 18 mm,焊缝高度降低幅度分别为 25.64% 和 21.14%。响应曲面在焊接速度方向的变化大于摆动幅度方向,表明焊接速度对焊缝高度的影响大于摆动幅度。

### 2.4 摆焊参数对焊缝宽度的影响

各因素与焊缝宽度之间的方差分析结果如表 4 所示。由表 4 可以得出,焊缝宽度关于各因素实际值的回归方程为

$$W = 27.94062 - 8.76500v_f - 1.79500v + 0.87917A - 0.043333v_f \cdot v - 0.045833v_f \cdot A + 0.043889v \cdot A + 1.10750v_f^2 + 0.092500v^2 + 1.31944 \times 10^{-3}A^2$$

表 4 焊缝宽度模型的方差分析

Table 4 Variance analysis of weld width models

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值	显著性
模型	291.52	9	32.39	194.51	<0.000 1	显著
$v_f$	1.23	1	1.23	7.40	0.029 7	
$v$	8.99	1	8.99	53.98	0.0002	
$A$	269.82	1	269.82	1 620.24	<0.000 1	
$v_f \cdot v$	0.068	1	0.068	0.41	0.544 3	
$v_f \cdot A$	0.30	1	0.30	1.82	0.219 7	
$v \cdot A$	2.50	1	2.50	14.99	0.006 1	
$v_f^2$	5.16	1	5.16	31.01	0.000 8	
$v^2$	2.92	1	2.92	17.52	0.004 1	
$A^2$	0.009 5	1	0.009 5	0.057	0.818 1	
残差	1.17	7	0.17			
失拟度	0.67	3	0.22	1.83	0.282 5	不显著
纯误差	0.49	4	0.12			
总和	292.69	16				

由表 4 可知,模型的  $P < 0.000 1$ ,模型的失拟度对应的  $P$  值为 0.282 5 不显著,表明回归方程拟合度较好,模型有效<sup>[16]</sup>。图 9 为焊缝宽度模型的残差正态概率分布图,可见数据点基本位于直线上,说明模型可以准确地预测响应值。

图 10(a)是摆动幅度不变,焊接速度与送丝

速度对焊缝宽度的交互影响,可以看出:焊接速度与焊缝宽度成负相关,是由于焊接速度增加,热输入减小导致焊缝宽度减小;送丝速度与焊缝宽度成正相关,是由于送丝速度增加时,焊丝熔化量增大导致焊缝宽度增加。当焊接速度分别为 3,9 mm/s 时,送丝速度从 3.5 m/min 增加到 5.5 m/min,焊缝宽度增加幅度分别为 4.49% 和 1.61%;当送丝速度分别为 3.5,5.5 m/min 时,焊接速度从 3 mm/s 增加到 9 mm/s,焊缝宽度降低幅度分别为 9.27% 和 11.92%。响应曲面在焊接速度方向的变化大于送丝速度方向,说明焊接速度对焊缝宽度的影响大于送丝速度。

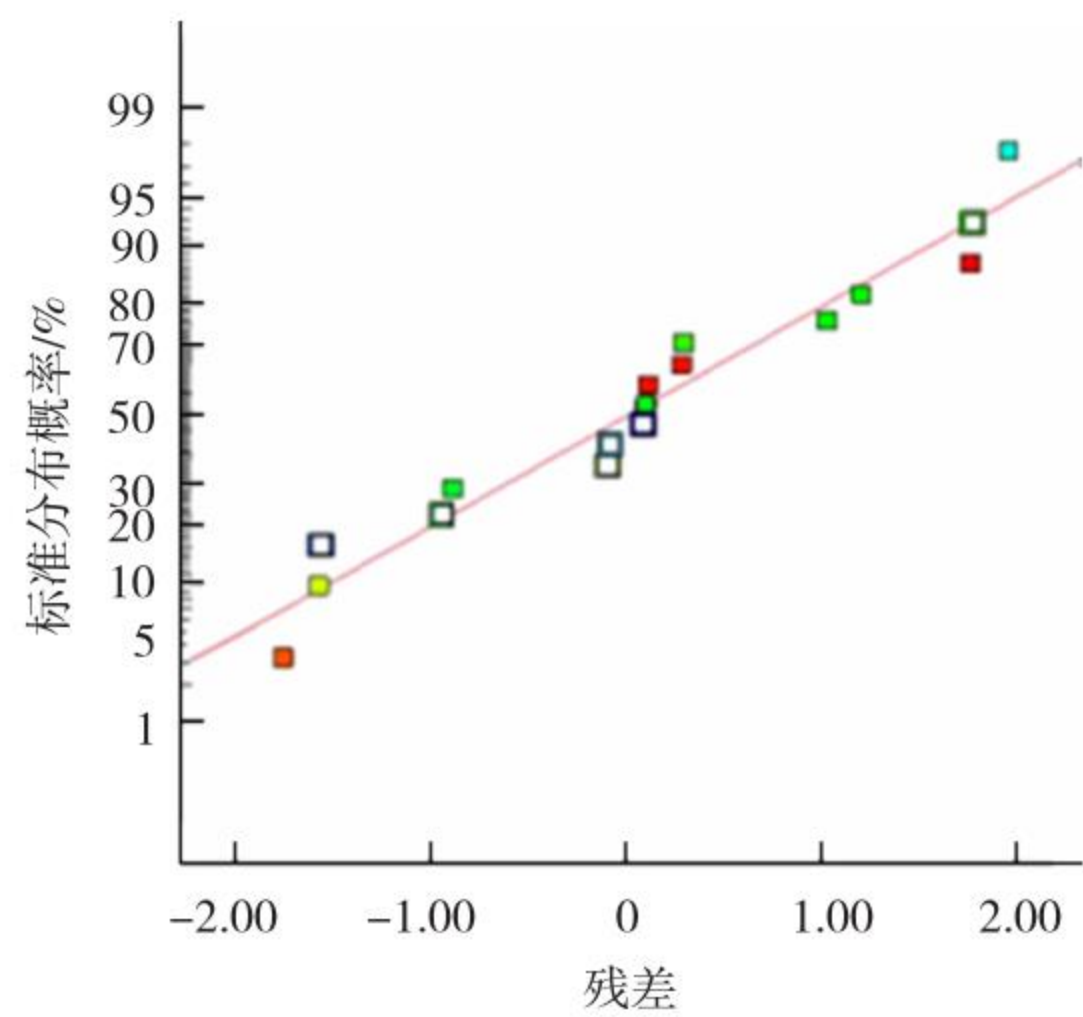


图 9 焊缝宽度残差分布图

Fig. 9 Weld width residual distribution plot

图 10(b)是焊接速度不变,送丝速度与摆动幅度对焊缝宽度的交互影响。由图 10(b)可以看出:摆动幅度与焊缝宽度成正相关,是由于摆动幅度增加,焊丝熔化量不变,热输入不变而焊丝熔覆的面积加大导致焊缝宽度增加。当摆动幅度分别为 6,18 mm 时,送丝速度从 3.5 m/min 增加到 5.5 m/min,焊缝宽度增加幅度分别为 16.67% 和 2.46%;当送丝速度分别为 3.5,5.5 m/min 时,摆动幅度从 6 mm 增加到 18 mm,焊缝宽度增加幅度分别为 60.72% 和 54.02%。响应曲面在摆动幅度方向的变化大于送丝速度方向,说明摆动幅度对焊缝宽度的影响大于送丝速度。

图 10(c)是送丝速度不变,焊接速度和摆动幅度对焊缝宽度的交互影响。当摆动幅度分别为 6,18 mm 时,焊接速度从 3 mm/s 增加到 9 mm/s,焊缝宽度降低幅度分别为 36.84% 和 4.35%;当焊接速度分别为 3,9 mm/s 时,摆动幅度从 6 mm 增加到 18 mm,焊缝宽度增加幅度分别为 46.76% 和 64.85%。响应曲面在摆动幅度方向的变化大于焊接速度方向,说明摆动幅度对焊缝宽度的影响大于焊接速度。

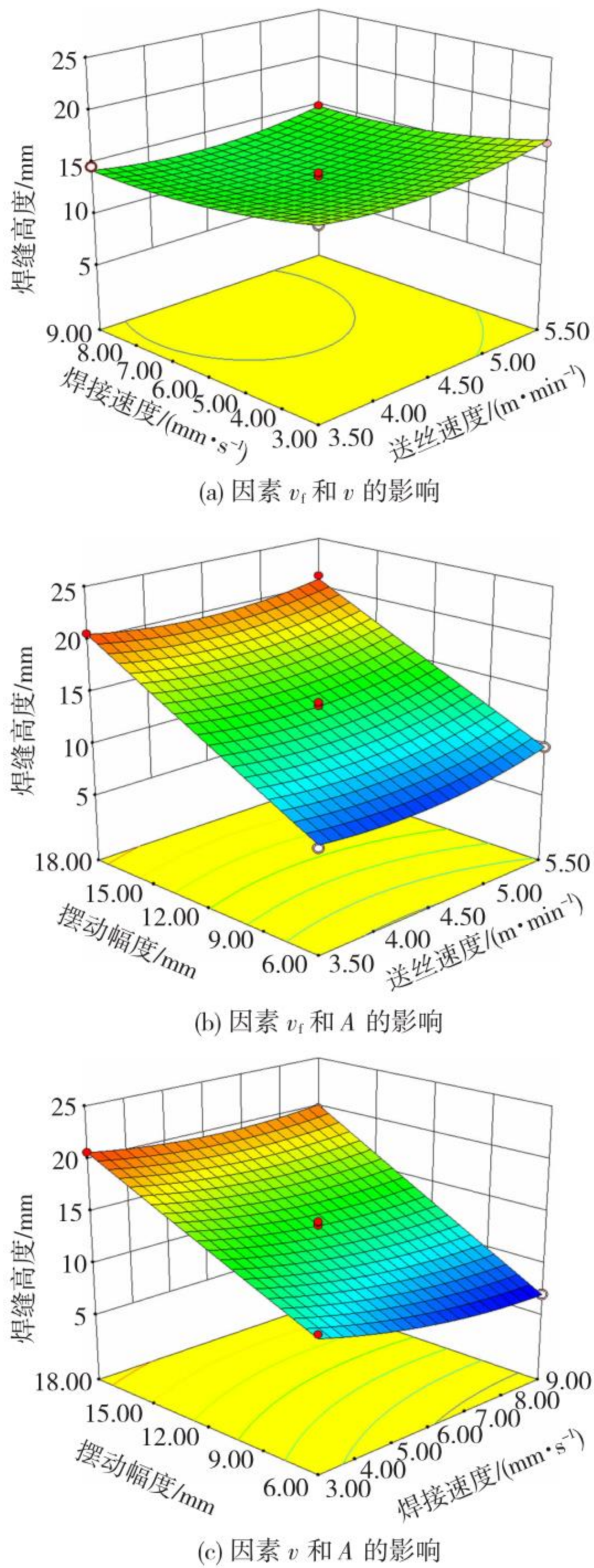


图 10 各因素对焊缝宽度的响应曲面模型

Fig. 10 Surface model of the response of each factor to the width of the weld; (a) influence of factors  $v_f$  and  $v$ ; (b) influence of factors  $v_f$  and  $A$ ; (c) influence of factors  $v$  and  $A$

2.5 摆焊参数对焊缝熔深的影响

各因素与焊缝熔深之间的方差分析结果如表5所示。由表5可以得出,焊缝熔深关于各因素实际值的回归方程如下。

$$D = -6.67969 + 3.48150v_f - 0.38283v + 0.28358A - 0.00875v_f \cdot A + 0.000833333v \cdot A - 0.34225v_f^2 + 0.023917v^2 - 0.011729A^2$$

由表5可知,模型的P值为0.0045显著,失拟度对应的P为0.0946不显著,表明回归方程拟合度较好模型有效<sup>[17]</sup>。

图11为焊缝熔深模型的残差正态概率分布图,可见数据点基本位于直线上,说明模型可以准确地预测响应值。

表5 焊缝熔深模型的方差分析

Table 5 Variance analysis of weld penetration depth models

方差来源	平方和	自由度	均方差	F值	P值	显著性
模型	2.98	9	0.33	8.79	0.0045	显著
$v_f$	0.70	1	0.70	18.62	0.0035	
$v$	0.53	1	0.53	14.07	0.0072	
$A$	0.30	1	0.30	7.96	0.0257	
$v_f \cdot A$	0.011	1	0.011	0.29	0.6055	
$v \cdot A$	0.0009	1	0.0009	0.024	0.8816	
$v_f^2$	0.49	1	0.49	13.08	0.0085	
$v^2$	0.20	1	0.20	5.17	0.0571	
$A^2$	0.75	1	0.75	19.91	0.0029	
残差	0.26	7	0.038			
失拟度	0.20	3	0.067	4.35	0.0946	不显著
纯误差	0.062	4	0.015			
总和	3.25	16				

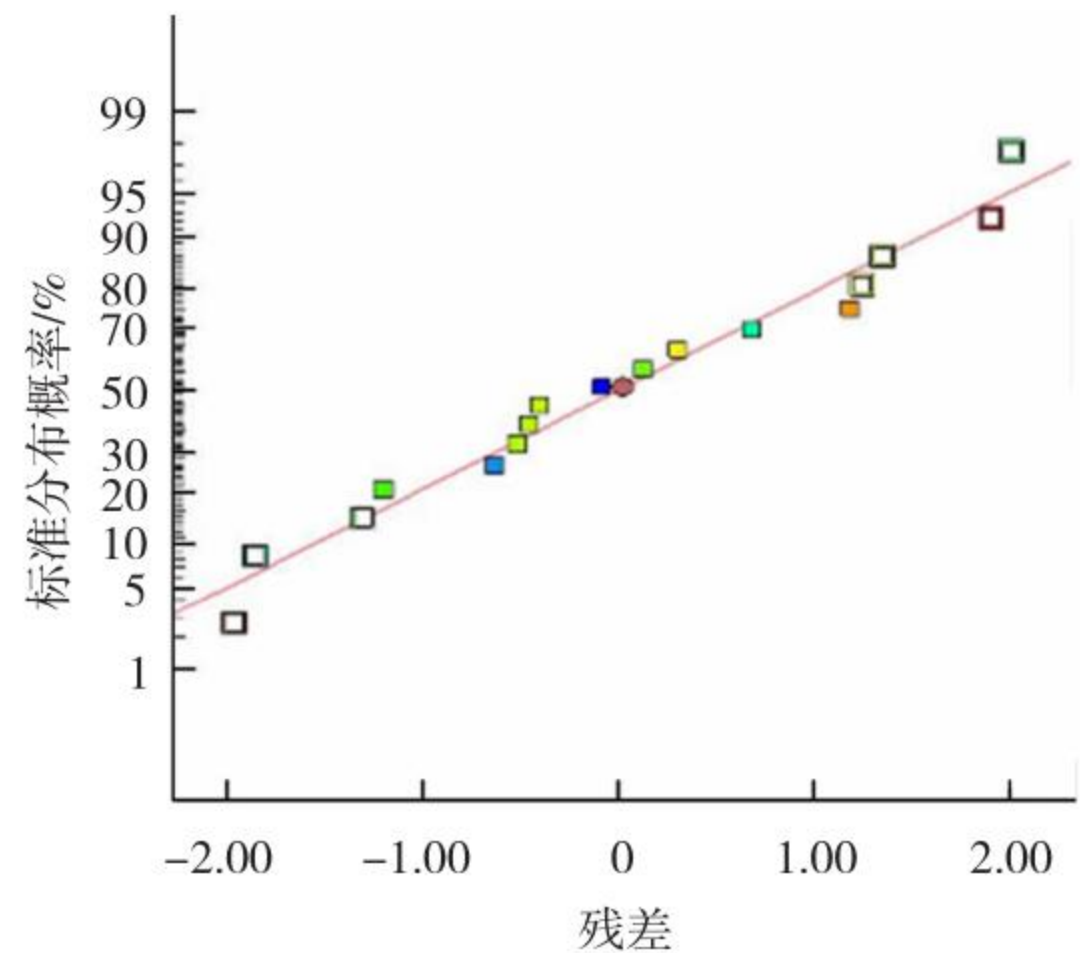
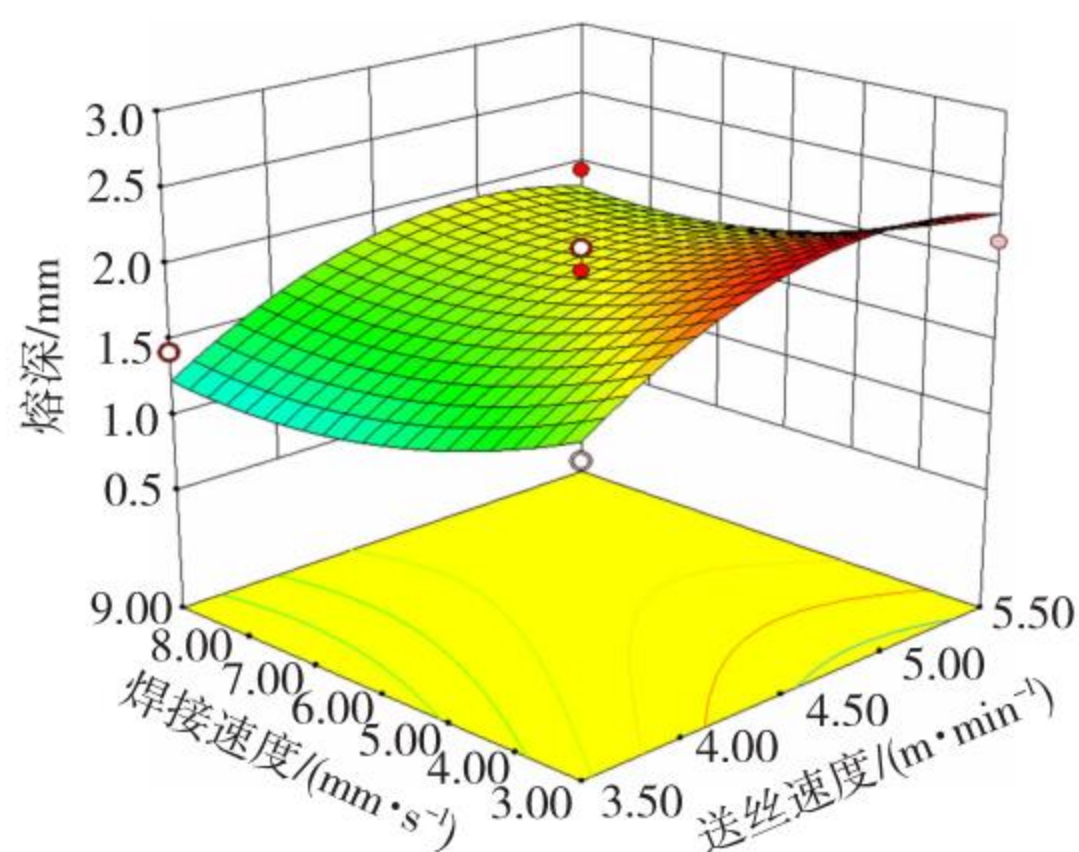


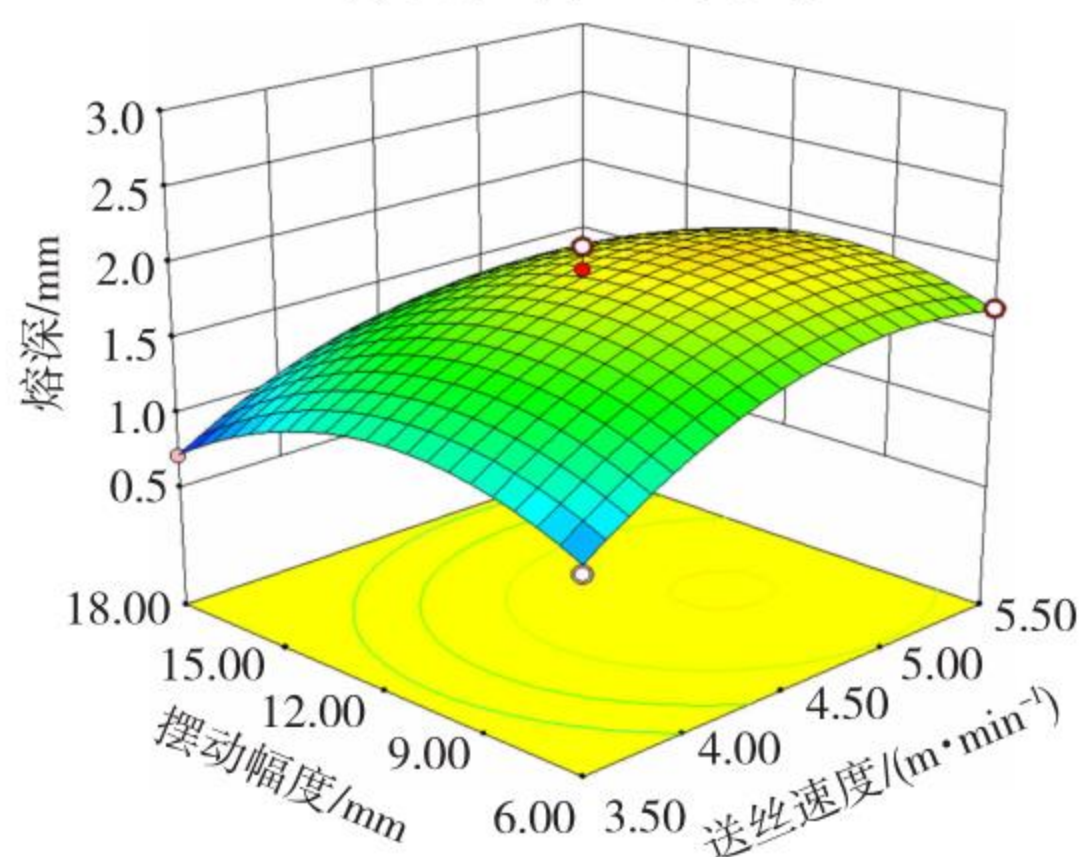
图 11 焊缝熔深残差分布图

Fig. 11 Weld penetration depth residual distribution plot

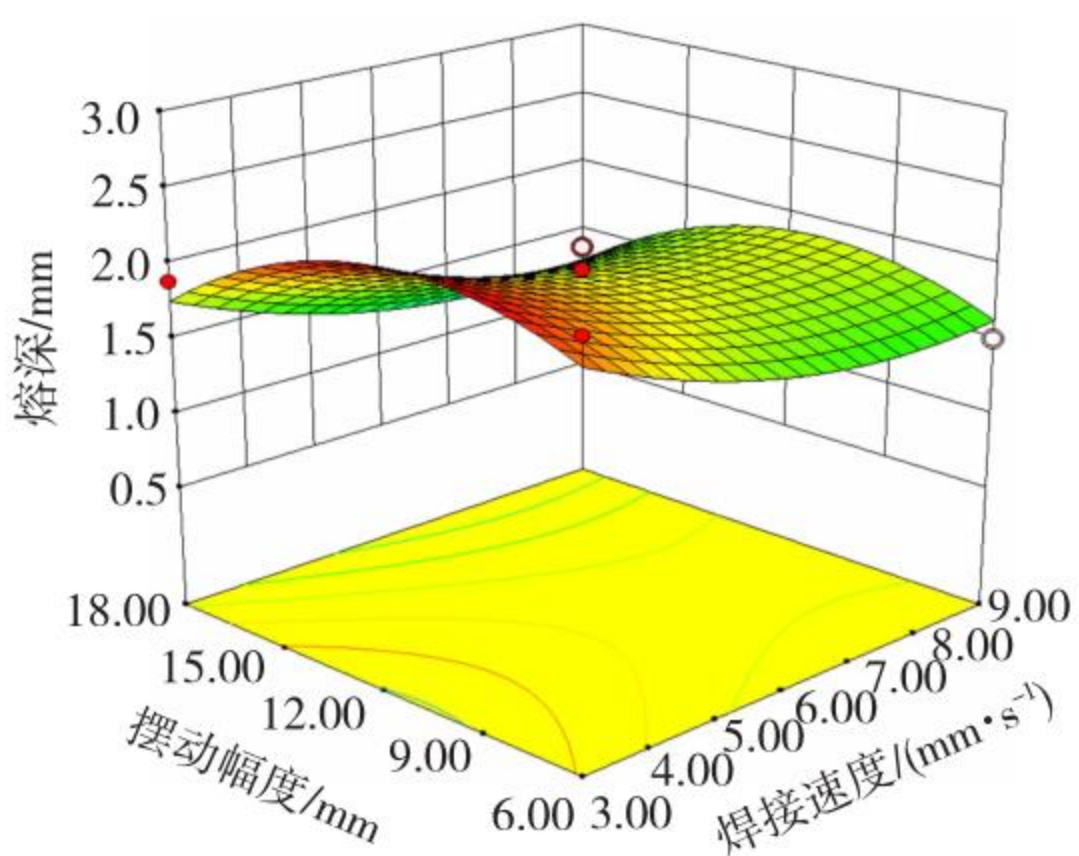
图12(a)是摆动幅度不变,焊接速度与送丝速度对焊缝熔深的交互影响。由图12(a)可以看出:焊接速度与焊缝熔深成负相关,这是由于焊接速度增加,热输入减小导致焊缝熔深减小;送丝速度与焊缝熔深成正相关,是由于送丝速度增加时,焊丝熔化量增加导致焊缝熔深增加。当焊接速度分别为3,9 mm/s时,送丝速度从3.5 m/min增加到5.5 m/min,焊缝熔深增加幅度分别为24.07%和26.67%;当送丝速度分别为3.5,5.5 m/min时,焊接速度从3 mm/s增加到9 mm/s,焊缝熔深降低幅度分别为12.80%和9.72%。响应曲面在送丝速度方向的变化大于焊接速度方向,说明送丝速度对焊缝熔深的影响大于焊接速度。



(a) 因素  $v_f$  和  $v$  的影响



(b) 因素  $v_f$  和  $A$  的影响



(c) 因素  $v$  和  $A$  的影响

图 12 各因素对焊缝熔深的响应曲面模型

Fig. 12 Surface model of response of each factor to penetration of the weld: (a) influence of factors  $v_f$  and  $v$ ; (b) influence of factors  $v_f$  and  $A$ ; (c) influence of factors  $v$  and  $A$

图 12(b) 是焊接速度不变, 送丝速度与摆动幅度对焊缝熔深的交互影响, 可以看出: 摆动幅度

与焊缝熔深成负相关, 是由于摆动幅度增加, 焊丝熔化量不变, 热输入不变而焊丝熔覆的面积加大导致焊缝熔深稍有降低但影响很小。当摆动幅度分别为 6, 18 mm 时, 送丝速度从 3.5 m/min 增加到 5.5 m/min, 焊缝熔深增加幅度分别为 45.03% 和 44.09%; 当送丝速度分别为 3.5, 5.5 m/min 时, 摆动幅度从 6 mm 增加到 18 mm, 焊缝熔深降低幅度分别为 24.47% 和 25.73%。响应曲面在送丝速度方向的变化大于摆动幅度方向, 表明送丝速度对焊缝熔深的影响大于摆动幅度。

图 12(c) 是送丝速度不变, 焊接速度和摆动幅度对焊缝熔深的交互影响。由图 12(c) 可以看出: 当摆动幅度分别为 6, 18 mm 时, 焊接速度从 3 mm/s 增加到 9 mm/s, 焊缝熔深降低幅度分别为 36.02% 和 41.80%; 当焊接速度分别为 3, 9 mm/s 时, 摆动幅度从 6 mm 增加到 18 mm, 焊缝熔深降低幅度分别为 19.92% 和 26.49%。响应曲面在焊接速度方向的变化大于摆动幅度方向, 表明焊接速度对焊缝熔深的影响大于摆动幅度。

### 3 实验验证

选取 6 组差异较大的参数, 并采用图 5 所示的摆焊轨迹进行实验验证, 验证参数如表 6 所示。将得到的 6 条焊缝的高度、宽度、熔深分别测量 5 次后取平均值, 结果如表 7 所示, 其中  $|D|$  表示实际值与预测值的差异<sup>[18]</sup>, 求取公式为  $|D| = (\text{实际值} - \text{预测值}) / \text{实际值}$ 。结果表明, 实际值与预测值之间均存在微小差异, 差异可能是由于焊枪角度和其他输入参数的误差而产生的, 但误差基本都小于 5%, 可以证明模型有效。

表 6 选定的实验验证参数

Table 6 Selected validation parameters of the experiment

摆焊参数	组别					
	1 组	2 组	3 组	4 组	5 组	6 组
$v_f$	5.14	4.95	4.98	4.90	4.79	4.77
$v$	3.00	3.00	3.00	3.00	9.00	9.00
$A$	11.84	9.52	8.57	11.05	10.13	10.80

表 7 实验验证结果

Table 7 Validation results of the experiments

顺序	W/mm		$ D /\%$	H/mm		$ D /\%$	D/mm		$ D /\%$
	预测	实际		预测	实际		预测	实际	
1	16.28	16.51	1.39	2.87	2.79	2.87	2.46	2.35	4.68
2	14.08	14.62	3.69	2.95	3.02	2.32	2.58	2.66	3.01
3	13.36	13.54	1.33	2.95	2.90	1.72	2.57	2.64	2.65
4	15.24	14.56	4.67	2.91	2.85	2.11	2.53	2.46	2.85
5	11.65	12.10	3.72	2.27	2.33	2.58	1.85	1.81	2.21
6	12.26	12.56	2.39	2.28	2.37	3.80	1.88	1.80	4.44

## 4 结 论

1)提出了一种基于响应曲面法对摆焊工艺参数进行分析的方法,建立了焊缝外观尺寸与摆焊工艺参数之间的二阶多项式数学模型,并通过实验验证证明了该模型的有效性。

2)采用控制单一变量法,研究了摆动参数对焊缝成型的影响,得出摆动长度为3 mm,侧壁停留长度为0.5 mm的摆焊轨迹焊道成型较好,符合焊接成型要求。

3)从响应曲面模型可知,焊缝高度影响因子的显著性排序为送丝速度 > 焊接速度 > 摆动幅度。随送丝速度增大焊缝高度增大,随焊接速度增大焊缝高度减小,随摆动幅度增大焊缝高度减小,但作用效果不显著。焊缝宽度影响因子的显著性排序为摆动幅度 > 焊接速度 > 送丝速度。随摆动幅度增大焊缝宽度迅速增大,随焊接速度增大焊缝宽度减小,随送丝速度增大焊缝宽度增大,但作用效果不显著。焊缝熔深影响因子的显著性排序为送丝速度 > 焊接速度 > 摆动幅度。随送丝速度增大焊缝熔深增大,随焊接速度增大焊缝熔深减小,随摆动幅度增大焊缝熔深减小,但作用效果不显著。

## 参考文献:

- [1] 赵俊鹏,刘子奇,刘长军. 激光-CMT复合焊接的研究现状[J]. 热加工工艺,2022,51(9):7-12.  
ZHAO Junpeng, LIU Ziqi, LIU Changjun. Research status of laser-CMT composite welding [J]. Hot Working Technology, 2022, 51(9):7-12.  
DOI:10.14158/j.cnki.1001-3814.20212964
- [2] 谷世伟,徐良,杨海锋,等. X70 管线钢在役焊接损伤演化模型与数值模拟[J]. 焊接学报,2022,43(10):86-92,100,118.  
GU Shiwei, XU Liang, YANG Haifeng, et al. Evolution model and numerical simulation of welding damage in service of X70 pipeline steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(10):86-92,100,118.  
DOI:10.12073/j.hjxb.20220307001
- [3] 李光霁,刘新玲. 汽车轻量化技术的研究现状综述[J]. 材料科学与工艺,2020,28(5):47-61.  
LI Guangqi, LIU Xinling. Review of research status of automobile lightweight technology [J]. Materials Science and Technology, 2020,28(5):47-61.  
DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20190232
- [4] LAPLANTE Willian S,宋忠明. 高轴重线路的宽缝焊接[J]. 国外机车车辆工艺,2014,290(6):28-30.  
LAPLANTE Willian S, SONG Zhongming. Wide seam welding of high axle load line[J]. Foreign Locomotive & Rolling Stock Technology, 2014,290(6):28-30.
- [5] WANG Jiayou, ZHU Jie, FU Ping, et al. A swing arc system for narrow gap GMA welding [J]. ISIJ International, 2012, 52(1):110-114.  
DOI:10.2355/isijinternational.52.110
- [6] 白世武,丁红胜,童莉葛,等. X80 管线钢半自动焊摆焊与排焊的热循环过程对比研究[J]. 金属世界,2018,195(1):45-48.  
BAI Shiwu, DING Hongsheng, TONG Lige, et al. Comparative study on thermal cycling process of semi-automatic pendulum welding and row welding of X80 pipeline steel [J]. Metal World, 2018, 195(1):45-48.
- [7] LIU Yan, REN Lijuan, TIAN Xincheng. A robot welding approach for the sphere-pipe joints with swing and multi-layer planning[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019,105:265-278.  
DOI:10.1007/s00170-019-04216-w
- [8] 李琴,王于豪,丁雅萍,等. 焊接工艺参数对 Q345 钢平板焊接残余应力的影响[J]. 材料科学与工艺,2020,28(6):80-87.  
LI Qin, WANG Yuhao, DING Yaping, et al. Influence of welding process parameters on residual stress of Q345 steel plate welding [J]. Materials Science and Technology,2020,28(6):80-87.  
DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20190037
- [9] 姜云禄. 基于冷金属过渡技术的铝合金快速成形技术及工艺研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.  
JIANG Yunlu. Research on rapid prototyping technology and process of aluminum alloy based on cold metal transition technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2013.
- [10] 侯仰强,王天琪,李亮玉,等. 摆焊参数对焊缝成型的影响分析[J]. 焊接,2017(3):26-30,47.  
HOU Yangqiang, WANG Tianqi, LI Liangyu, et al. Analysis of the influence of pendulum welding parameters on weld formation[J]. Welding & Joining, 2017(3):26-30,47.
- [11] WANG Jiayou, ZHU Jie, ZHANG Cai, et al. Effect of arc swing parameters on narrow gap vertical GMA weld formation[J]. ISIJ International,2016,56(5):844-850.  
DOI:10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-660
- [12] SHI Hao, ZHANG Ke, XU Zhengyi, et al. Applying statistical models optimize the process of multi-pass narrow-gap laser welding with filler wire [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(1-4):279-291.  
DOI:10.1007/s00170-014-6159-y

- [13] 宋娇娇,邢保英,何晓聪,等. 基于响应面法的自冲铆-粘接复合接头强度预测[J]. 材料科学与工艺, 2023,31(6):37-43.  
SONG Jiaojiao, XING Baoying, HE Xiaocong, et al. Strength prediction of self-piercing riveting-bonded composite joints based on response surface method [J]. Materials Science and Technology, 2023, 31 ( 6 ): 37-43.  
DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20220291
- [14] CHEN Zhengwei, LI Chang, HAN Xing, et al. Sensitivity analysis of the MIG welding process parameters based on response surface method [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2020(10):1-20.  
DOI:10.1080/01694243.2020.1816778
- [15] 谭钦,周勇,李卫东,等. 基于响应面法的 MIG 焊工艺参数优化 [J]. 热加工工艺, 2022, 51 ( 19 ): 103-108,113.  
TAN Qin, ZHOU Yong, LI Weidong, et al. Optimization of MIG welding process parameters based on response surface method [J]. Hot Working Technology, 2022,51(19):103-108,113.  
DOI:10.14158/j.cnki.1001-3814.20202719
- [16] 成奇,郭宁,付云龙,等. 基于响应曲面法的铝合金激光封边焊接 [J]. 焊接学报, 2022, 43 ( 10 ): 1-10,113.  
CHENG Qi, GUO Ning, FU Yunlong, et al. Laser edge sealing welding of aluminum alloy based on response surface method [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(10):1-10,113.  
DOI:10.12073/j.hjxb.20210903001
- [17] 褚自军,杨煜普. 基于响应曲面法的涡轮增压器废气阀门激光焊接工艺优化研究 [J]. 柴油机设计与制造, 2021, 27(1):52-57.  
CHU Zijun, YANG Yipu. Research on the optimization of laser welding process for waste gate valves of turbochargers based on response surface methodology [J]. Diesel Engine Design and Manufacturing, 2021, 27(1):52-57.  
DOI:10.3969/j.issn.1671-0614.2021.01.011
- [18] 张义福,张华,况菁,等. 铜/铝极耳超声波焊接响应曲面优化分析 [J]. 材料导报, 2019, 33 ( 11 ): 1842-1847.  
ZHANG Yifu, ZHANG Hua, KUANG Jing, et al. Response surface optimization analysis of ultrasonic welding for copper/aluminum tabs [J]. Materials Reports, 2019, 33(11):1842-1847.  
DOI:10.11896/cldb.18030169

(编辑 吕雪梅)

**本文引用格式:**

- 何俊杰,郝佳鑫,王天琪. 基于响应曲面法的摆焊工艺参数分析 [J]. 材料科学与工艺, 2024, 32 ( 6 ): 10-18. DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20230070
- HE Junjie, HAO Jiaxin, WANG Tianqi. Analysis of pendulum welding process parameters based on response surface method [J]. Materials Science and Technology, 2024, 32 ( 6 ): 10-18. DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20230070