

# 电弧堆焊参数对焊道形貌的影响规律

吴超群<sup>1,2,3</sup>, 顾世阳<sup>1</sup>, 雷艇<sup>1,2</sup>, 余慧雯<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学, 武汉 430070; 2. 数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074;  
3. 武汉理工大学 硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:** 文中以单道焊缝形貌为切入点, 研究工艺参数对焊道形貌的影响并建立回归方程以预测焊道尺寸。结果表明, 焊接电流对焊道尺寸的影响最显著, 焊接电流每提高 50 A, 焊缝宽度平均增大 14%, 不同工艺参数间存在一定耦合关系, 同时揭示了焊接电流和焊接速度的增加引起电弧动压力变化进而导致焊缝由指状向碗状形貌转变的规律。对比多种回归模型, 综合考虑工艺参数耦合的影响, 提出基于剔除低相关因子的响应曲面法, 整体回归效果好, 试验表明该模型的  $R^2$  均在 0.97 以上, 预测误差在 5% 以内。建立的回归模型将为电弧堆焊层数与道数的规划提供准确的焊道尺寸信息, 确保机器人焊接位姿满足工艺要求。

**关键词:** 电弧堆焊; 工艺参数; 焊道尺寸; 回归分析

中图分类号: TG444+2 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20220531001

## The influence of arc surfacing parameters on weld bead morphology

Wu Chaoqun<sup>1,2,3</sup>, Gu Shiyang<sup>1</sup>, Lei Ting<sup>1,2</sup>, Yu Huiwen<sup>1</sup>

(1. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Wuhan 430074, China; 3. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** This paper takes the shape of single weld as the starting point to study the influence of welding process parameters on the weld bead morphology and establish a regression equation to predict the weld bead size. The research shows that the welding current has the most significant effect on the weld bead size. When the welding current increases by 50 A, the weld width increases by 14% on average. There is a certain coupling relationship between different process parameters. At the same time, it reveals the law that the increase of welding current and welding speed causes the change of arc dynamic pressure, which leads to the transformation of weld shape from finger to bowl. The reason for the change from finger-like morphology to bowl-like morphology. Compared with various regression models, the response surface method based on the elimination of low correlation factors proposed by considering the coupling effect of process parameters has a good overall regression effect, with  $R^2$  above 0.97 and the average error within 0.5%. The regression model established in this paper will provide accurate weld bead size information for the planning of arc surfacing layers and passes, and ensure that the robot welding pose meets the process requirements.

**Key words:** arc surfacing, process parameters, weld bead size, regression equation

## 0 前言

堆焊是通过将熔融金属堆覆于基材表面, 改变基材表面状态或实现对表面损伤的修复。根据热源的不同堆焊可分为激光堆焊、电子束堆焊和电弧堆焊

等<sup>[1]</sup>。电弧堆焊是以电弧为热源将焊丝或金属粉末熔化进行熔覆, 与其他堆焊方法相比具有成形效率高、成本低、适用范围广、可实现局部位置的修复等优势。

相较于人工堆焊, 自动化电弧堆焊在系统构建工艺参数对焊缝成形作用机理的基础上进行工艺的制

定与改进。因此研究不同工艺参数及不同工艺参数之间的组合对焊道形貌的影响对于实现智能化电弧堆焊具有重要意义。丁成钢等人<sup>[2]</sup>指出增加混合气中氧气的含量会增大焊接时的阴极斑点,使电弧静压力分散,焊缝宽度、熔深和焊缝余高都有所增加,熔池底端的指状熔深变为盆状熔深。周祯童等人<sup>[3]</sup>研究发现焊接电流增大,熔宽显著增加,余高增加较小,深宽比增大。徐锴等人<sup>[4]</sup>指出堆焊电流增大,熔深随之增加,但未说明其数学关系及原理。刘拥军等<sup>[5]</sup>指出送丝速度的增加和焊接速度的降低都会增加堆焊余高,且焊接速度与送丝速度对余高的交互影响最明显。因此,研究焊接工艺对焊道尺寸的影响规律对于工艺参数的选择并获得成形良好的焊缝具有重要意义。

电弧堆焊成形中,焊道的形貌与尺寸影响着焊接规划的精度与策略<sup>[6-7]</sup>,了解焊道尺寸的影响因素并能够较为准确的预测焊道形状,对于高精度、高效率焊接规划具有重要意义。对此有学者建立了基于焊接工艺参数的焊道基本尺寸的回归模型。Lei等人<sup>[8]</sup>建立了基于工艺参数与熔池形态的回归方程并取得了良好的预测效果,其MRE均小于5%,该思想可以推广到焊道形貌预测。Nalajam等人<sup>[9]</sup>使用神经网络预测工艺参数与不同焊道形状的关系,最大偏差为10%~15%。Zhao等人<sup>[10]</sup>使用最小二乘法得到工艺参数与焊道尺寸的回归模型并据此获得了最佳工艺参数,但模型 $R^2$ 偏低。陈喆等人<sup>[11]</sup>基于响应面法建立了铝合金焊道尺寸回归方程,以 $F$ 检验对方程拟合程度进行评价,但该方法未对多参数的耦合作用开展研究。上述研究均使用单一模型进行预测,对不同模型之间的对比较少,无法体现不同模型间的优劣,同时其误差率并不理想,模型具有进一步优化空间。

文中研究了工艺参数对电弧堆焊焊道形貌的影响,以单道焊缝形貌为切入点,并通过对比几种模型比较建立了基于焊接电流、焊接速度和焊接距离对焊道尺寸的最佳预测模型。

## 1 试验装置及方法

### 1.1 试验装置

试验使用ABB IRB-6700机器人实现对焊枪运动的精确控制,配合奥太MIG-500RP焊机进行单道熔覆焊接。试验中采用的基板为316不锈钢板,焊丝选

用松勒ER50-6气保焊焊丝。板材尺寸为200 mm × 100 mm × 6 mm。焊接方式为二氧化碳气体保护焊,焊接时气体流量为15 L/min,焊丝直径1.0 mm。

### 1.2 试验方法

试验采用的焊接电流 $I$ 设置三档为100, 125, 150 A;焊接速度 $v$ 设置三档为6, 8, 10 mm/s;焊接距离(导电嘴与工件的距离) $l$ 设置三档为9, 11, 13 mm。工艺参数共设计27组试验。试验过程中焊枪与母材垂直且全程姿态保持不变,机器人引导焊枪沿直线焊接,焊接后,沿焊缝的横向截面剖开,经抛光之后使用三氯化铁的盐酸溶液进行腐蚀。用焊缝宽度( $B/\text{mm}$ )、熔深( $H/\text{mm}$ )、焊缝余高( $h/\text{mm}$ )和焊道截面积( $S/\text{mm}^2$ )表征焊道尺寸,以研究不同工艺参数对焊缝形貌的影响,如图1所示。

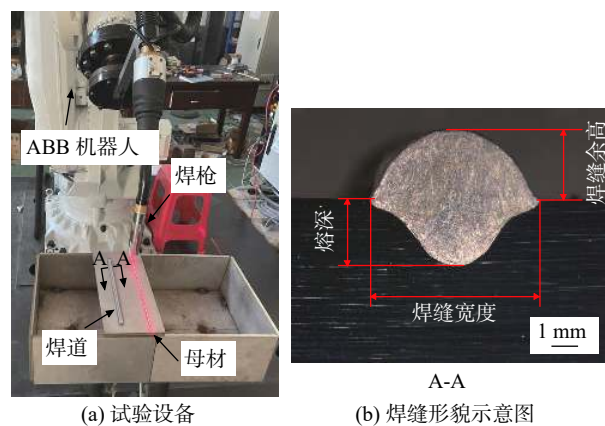


图1 焊接试验焊缝形貌示意图

## 2 焊道形貌的分析

试验表明工艺参数不同,焊缝宽度、熔深以及焊缝余高等存在显著差异。使用SPSS软件进行相关性分析可得出,焊缝宽度、熔深、焊缝余高和焊道截面积与电流的相关性最大,其次是焊接速度,与焊接距离相关性最小,见表1。

一般认为焊道的形貌受焊接热输入( $E$ )的影响,焊接热输入增加,焊缝尺寸会随之增大。焊接热输入同时受焊接电流 $I$ 、电弧电压 $U$ 、焊接速度 $v$ 以及热效率 $\eta$ 作用,不同工艺参数作用的效果各不相同,其对焊道形貌的影响如图2。

$$E = \frac{UI\eta}{v} \quad (1)$$

### 2.1 焊接距离对焊道形貌的影响

焊接距离主要影响着热效率,随着焊接距离的

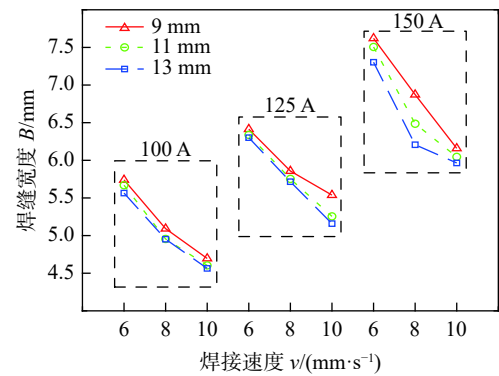
表 1 工艺参数与形貌参数的皮尔逊系数相关性

形貌参数	焊接距离 $l/\text{mm}$	焊接电流 $I/\text{mm}$	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$
焊缝宽度 $B/\text{mm}$	-0.125	0.790	-0.577
熔深 $H/\text{mm}$	-0.332	0.774	-0.478
焊缝余高 $h/\text{mm}$	-0.155	0.761	-0.597
焊道截面积 $S/\text{mm}^2$	-0.149	0.809	-0.528
深宽比 $\beta$	-0.734	0.341	0.053

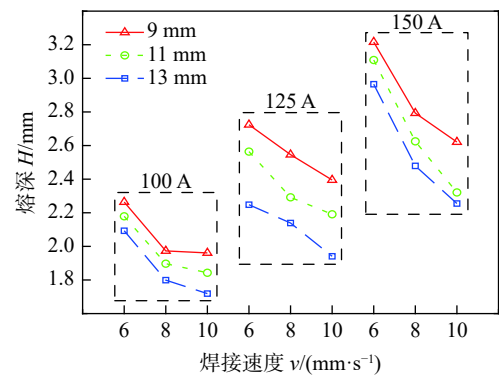
增大, 电弧长度增加, 电弧挺度和电弧力减小, 焊缝宽度、熔深、焊缝余高和焊道截面积等因此降低。从图 2a 和图 2b 可以看出, 焊接距离对熔深的影响要大于焊缝宽度, 这是因为电弧挺度与电弧力对熔池宽度的影响有限, 且电弧长度增加拓展了电弧区域, 所以随着焊接距离的增加深宽比降低。与其他工艺参数相比, 焊接距离对焊道形貌尺寸的影响并不显著。

### 2.2 焊接电流对焊道形貌的影响

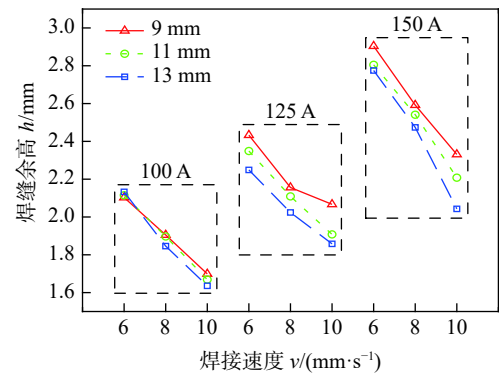
通过分析可知, 随着电流的增大, 焊接热输入增加, 电流与焊道形貌尺寸呈正相关, 即在焊接电流为 100 ~ 150 A 的条件下, 随着焊接电流的增大, 焊缝宽度、熔深、焊缝余高以及焊道截面积都会增加, 如图 2 所示。根据图 2a 中的数据发现, 焊接电流每提高 50 A, 焊缝宽度平均增大 14%。一般而言随着焊接电流的增加, 二保焊的熔滴过渡方式逐渐由短路过渡向滴状过渡转变, 熔滴越小, 熔深越深。试验使用的焊机自带焊接专家数据库, 在增加焊接电流时电弧电压会同步增大为适配值(焊接电流为 100, 125, 150 A 时, 电弧电压分别为 17, 17.8, 18.3 V), 电弧范围因此拓展, 焊缝宽度增加, 如图 2a 所示。增大焊接电流使得电磁收缩力与等离子流力增大, 电弧挖掘作用增强, 熔深增加, 如图 2b 所示。焊接热输入的增加使得单位时间内熔化焊丝的体积增大, 焊缝余高和焊缝截面积因此增加, 如图 2c 和图 2d。同时发现在随着焊接电流的增大, 焊缝形貌逐渐从“指状”向“碗状”过渡, 如图 3 所示。指状焊缝的产生与电弧动压力、保护气类型以及电弧是否旋转等有关, 试验中保护气类型未发生改变, 电弧也未添加外部因素使之旋转。在其他条件不变的情况下, 焊接电流越大, 中心线上电弧动压力越大, 分布的区间更为集中, 指状熔深更



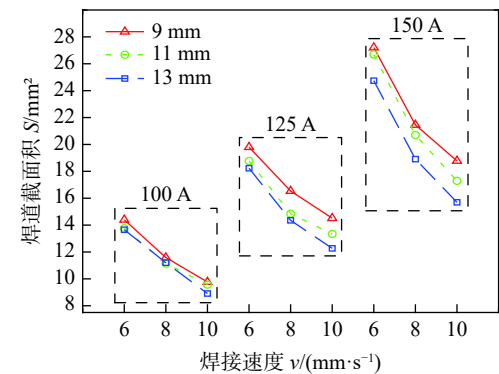
(a) 工艺参数对焊缝宽度的影响



(b) 工艺参数对熔深的影响



(c) 工艺参数对焊缝余高的影响



(d) 工艺参数对焊道截面积的影响

图 2 工艺参数对焊道尺寸的影响

显著,但试验中电弧电压的增大,拓展了电弧范围,电弧中心线上等离子气流速度增大时,周边的等离子气流速度同步增加,电弧动压力的分布区间变大,焊缝底部呈现碗状。这揭示了焊接电流和电弧电压是促使电弧动压力变化,进而影响焊缝由指状熔深向碗状熔深转变的重要工艺参数。

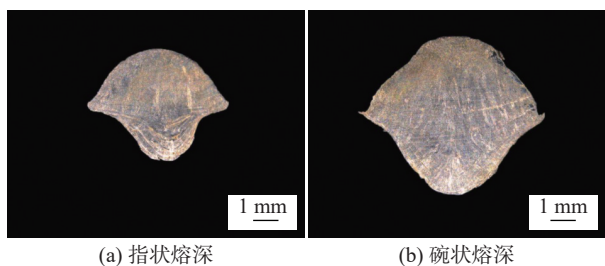


图3 指状熔深与碗状熔深形貌

### 2.3 焊接速度对焊道形貌的影响

焊接速度的增加降低了焊接热输入,在焊接速度为6~10 mm/s的条件下,焊接速度的增大将使得焊缝宽度、熔深等焊道形貌尺寸减小,如图2所示。其中焊接速度每提高2 mm/s,焊缝余高平均减小11%,如图2c所示。对比焊道整体形貌,焊接速度增大焊缝熔深逐渐从“指状”向“碗状”转变。在较低的焊接速度下,焊接热输入大,电弧的动压力作用于熔池的效果显著,随着焊接速度增加,等离子流力挖掘效果减弱,电弧作用于熔池的时间变短,熔滴能够充分过渡到熔池,焊道底部变得饱满,指状特征逐渐变为碗状特征。

### 2.4 多参数耦合对焊道形貌的影响

焊道的熔覆过程存在着类似图4所示的3个阶段,在a阶段电弧烧蚀母材形成凹槽,并形成熔池; b阶段熔池长大,液态金属进一步侵蚀母材同时渗入母材形成中间区域; c阶段熔融金属完全熔覆在母材后冷却形成焊道。随着焊枪的移动,焊道不断重复该过程,直至焊接结束焊道冷却并熔覆于母材表面。

$$v_w = k_m I + k_n I^2 \quad (2)$$

式中:  $v_w$  为焊丝熔化速度;  $k_m, k_n$  为温度函数;  $I$  为焊接电流;  $l$  为干伸长度。

根据式(1)可知,在其他条件不变的前提下,焊接速度减小以及焊接电流的增加会导致焊接热输入的增大。由焊丝熔化速度式(2)<sup>[12]</sup>可知,随着焊接距离与焊接电流增大,焊丝熔化速度增加,单位时间内

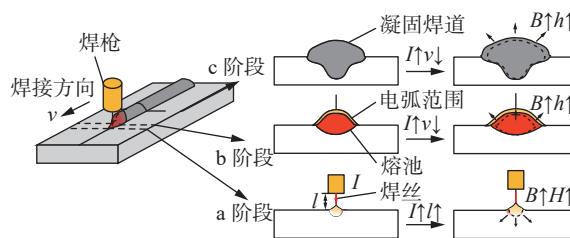


图4 堆焊熔覆过程

熔覆金属体积增多,焊缝宽度、熔深、焊缝余高以及焊缝截面积的增大,相关参数间存在一定的耦合关系。图2的a阶段,增加焊接电流同时减小焊接距离都将增大电弧挺度,电弧挺度增大,电磁收缩力、等离子流力以及洛伦兹力会增强电弧挖掘能力,使得凹槽扩大促使熔深增加; b阶段,焊接电流增加和焊接速度减小都会增大焊接热输入,增加单位时间内熔覆金属量,熔池体积增大,对母材的侵蚀作用更强,最终在c阶段熔覆在母材表面金属更多,熔宽和焊缝余高增加。

另一方面,焊接电流减小的同时增大焊接距离,焊缝尺寸均会减小,这是因为焊接距离对焊道形貌尺寸的影响要小于电流。焊接电流减小的同时减小焊接速度焊道形貌尺寸变化视焊接参数变化幅度而定,例如焊接距离不变时,焊接电流从150 A减小到100 A,焊接速度从10 mm/s减小到6 mm/s时焊道形貌尺寸依然增大,具体的变化需要结合预测模型分析。

## 3 焊道形貌尺寸的预测模型

试验中焊道形貌尺寸与焊接工艺参数呈现出显著相关性,因此可以通过建立数学模型用于预测不同工艺参数下焊道的焊缝宽度、熔深和焊缝余高等形貌尺寸特征。不同模型的拟合程度与难易度将影响未来相关研究的展开。为此,尝试使用多种方式建立焊道形貌与工艺参数之间的回归方程,并进行对比分析。

### 3.1 多重线性回归

试验涉及的因子较少,采用多重线性回归进行分析可以快速建立一个相对可靠的数学模型。多重线性回归控制多个混杂因素,对于彼此独立的因变量之间的评价具有客观性,可以方便预测因变量的值与变化,以焊接距离、焊接电流以及焊接速度作为自变量进行建模。

$$B = 4.901 - 0.063I + 0.032I - 0.291v, R^2 = 0.973, R^2(\text{adj}) = 0.969 \quad (3)$$

$$H = 2.277 - 0.079I + 0.014I - 0.114v, R^2 = 0.938, R^2(\text{adj}) = 0.929 \quad (4)$$

$$h = 1.944 - 0.032I + 0.013I - 0.123v, R^2 = 0.959, R^2(\text{adj}) = 0.954 \quad (5)$$

$$S = 9.54 - 0.446I + 0.194I - 1.586v, R^2 = 0.956, R^2(\text{adj}) = 0.951 \quad (6)$$

多重线性回归的拟合优度  $R^2$  都在 0.93 以上, 调整后的拟合优度  $R^2(\text{adj})$  都在 0.92 以上, 回归效果较好, 各系数的显著性水平  $p$  值均小于 0.01 (小于 0.05 的置信区间), 即该模型线性关系显著。考虑到该模型仅仅为简单的线性回归, 未考虑其他因素的影响, 因此该数学模型存在着一定的提升空间。

### 3.2 加权线性回归

线性回归的前提是残差恒定, 实际数据可能因为各种因素残差存在不同程度的偏差, 加权最小二乘

$$B = 4.634 - 0.045I + 0.031I - 0.266v, R^2 = 0.979, R^2(\text{adj}) = 0.977 \quad (7)$$

$$H = 2.037 - 0.07I + 0.015I - 0.097v, R^2 = 0.937, R^2(\text{adj}) = 0.929 \quad (8)$$

$$h = 1.824 - 0.015I + 0.011I - 0.112v, R^2 = 0.969, R^2(\text{adj}) = 0.965 \quad (9)$$

$$S = 5.424 - 0.236I + 0.184I - 1.212v, R^2 = 0.968, R^2(\text{adj}) = 0.964 \quad (10)$$

### 3.3 基于剔除低相关因子的响应面分析法

响应面分析法涉及多参数的相互作用, 建立的模型适合多元回归分析。试验中涉及的 3 个焊接参数为彼此独立的变量, 共同作用于焊缝, 实际焊接时工艺参数存在一定的耦合关系。

针对不同的形貌特征, 多参数共同作用的影响可能有限, 而响应曲面法把工艺参数之间的相互作用

$$B = 5.38 + 0.0895I + 0.0308I - 0.642v + 0.000119I^2 + 0.0369v^2 - 0.00122I * I - 0.00191I * v, \quad (11)$$

$$R^2 = 0.991, R^2(\text{adj}) = 0.987$$

$$H = 1.774 - 0.0793I + 0.0292I - 0.228v + 0.02115v^2 - 0.0018I * v, \quad (12)$$

$$R^2 = 0.972, R^2(\text{adj}) = 0.965$$

$$h = 1.856 + 0.0603I + 0.00232I - 0.0079v + 0.000122I^2 - 0.000738I * I - 0.000925I * v, \quad (13)$$

$$R^2 = 0.984, R^2(\text{adj}) = 0.979$$

$$S = 0.6 + 0.827I + 0.2588I - 2.352v + 0.0009I^2 + 0.2212v^2 - 0.0102I * I - 0.0222I * v, \quad (14)$$

$$R^2 = 0.994, R^2(\text{adj}) = 0.992$$

相较于多重线性回归, 响应面分析法构建的模型的  $R^2$  都有显著提高, 预测模型的拟合效果有所上升, 因此使用优化后的响应面分析法构建回归模型更为合理。

### 3.4 预测模型检验

将之前的 27 组数据重新代入回归模型中, 依次得到焊缝宽度、熔深、焊缝余高和焊道截面积的预测值, 并与原始值进行比较, 得到预测模型的误差率。误差率以箱型图表示, 如图 5 所示。熔深和焊道截面

法是对线性回归的一种优化与修正, 使之模型更为合理。由于焊道形貌与焊接电流的相关性最强, 且设置焊接距离或焊接速度为权重变量时  $R^2$  均低于使用焊接电流, 因此把焊接电流作为权重变量进行加权回归较为合理。使用加权线性回归进行建模后  $R^2$  都有所提高, 模型的优化效果显著。相较于单纯的线性回归, 加权分析的拟合程度更好, 模型更为合理。为了进一步提升预测模型的拟合效果, 寻找其他回归模型进行对比分析以提高模型准确性。

共同作为影响变量, 为此文中有针对性地剔除掉低相关性因子 (理论上应剔除所有  $p$  值大于 0.01 的因子, 实际在试验中发现焊接电流—焊接距离, 焊接电流—焊接速度存在着耦合关系, 因此, 在进行回归分析时不应只从数学的角度考虑而忽略实际工况, 应保留相关系数) 后重新构建回归模型, 将进一步提高数学模型的准确性。采用响应面分析法建立的模型, 即

积的预测误差相对较大, 但多数均误差保持在 2% 以内, 平均误差在 0.5% 以下, 再次验证经过文中改进后的响应面分析法拟合效果好。

为进一步验证回归模型预测的准确性, 额外进行 3 组工艺参数在试验范围内的试验, 测量其焊道尺寸, 并与回归模型进行比较, 以检验模型预测的精度, 工艺参数见表 2。

试验结果见表 3, 除了试验预测的焊缝余高相较于真实值偏大外, 其余预测值相较于真实值都偏小,

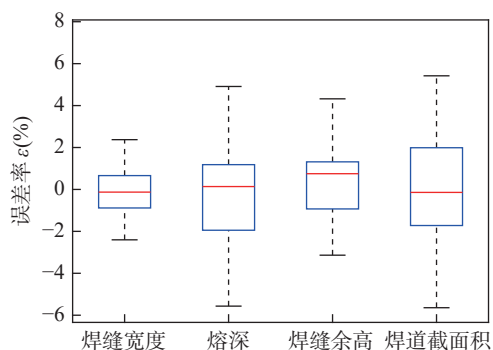


图5 焊缝预测尺寸误差箱型图

表2 验证试验工艺参数

序号	焊接距离 $l/\text{mm}$	焊接电流 $I/\text{A}$	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$
1	9	110	8
2	9	125	9
3	12	125	8

误差率均在5%以内。验证试验表明,建立的预测模型预测效果好,精度高。

表3 模型预测精度检验结果

序号	试验参数	焊缝宽度 $B/\text{mm}$	熔深 $H/\text{mm}$	焊缝余高 $h/\text{mm}$	焊道截面积 $S/\text{mm}^2$
1	实际值	5.55	2.31	1.94	13.78
	预测值	5.35	2.21	2.01	13.12
	误差率	3.68%	4.31%	3.75%	1.66%
2	实际值	5.75	2.40	1.98	15.13
	预测值	5.58	2.34	2.07	14.77
	误差率	4.59%	2.27%	4.43%	2.33%
3	实际值	5.91	2.30	2.17	15.21
	预测值	5.64	2.20	2.10	14.80
	误差率	4.48%	4.42%	3.37%	2.71%

#### 4 结论

(1)在试验条件下,焊接电流和焊接距离的增大都会使电弧范围拓展进而增大焊缝宽度,焊接电流的增大和焊接距离的减小都会增加电弧挖掘力,促使熔深增大。

(2)在试验的条件下,焊接电流对焊道尺寸的影响最为显著,而焊接距离的影响程度最小,但焊接距离对焊道深宽比的影响最为显著。焊接电流每提高50 A,焊缝宽度平均增大14%,焊接速度每提高2 mm/s,焊缝余高平均减小11%,焊接电流与焊接距离、焊接电流与焊接速度之间对焊道尺寸的影响存在一定的耦合关系。

(3)在试验条件下,焊接电流和焊接速度的增大都会使焊缝从指状形貌向碗状形貌转变,主要原因是电弧动压力随着焊接电流的增加而变大,随着焊接速度的增加电弧接触时间变短,二者均会导致碗状形貌的产生。

(4)建立了焊接工艺参数与焊道形貌的回归方程,且拟合效果显著,响应曲面法在剔除低相关性因子时考虑不同参数的耦合作用并针对性保留,模型 $R^2$ 均在0.97以上,预测误差在5%以下,最后采用额外的工艺参数验证回归模型预测准确。

#### 参考文献

- [1] Azwan M, Maleque M A, Rahman M M. TIG torch surfacing of metallic materials-a critical review[J]. Transactions of the IMF, 2018, 97(1): 12 - 21.
- [2] 丁成钢, 梁力仁, 焦健强, 等. 三元混合气体保护下Q460E钢MAG焊的工艺性能及接头的组织性能[J]. 热加工工艺, 2018, 47(7): 67 - 70.
- [3] 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(17): 135 - 139.
- [4] 徐锴, 冯伟, 邹力维, 等. 工艺参数对带极单层电渣堆焊层成分、成形及性能的影响[J]. 焊接, 2019(12): 32 - 36.
- [5] 刘拥军, 郭占英, 方海鹏. 基于RSM的GH3128镍基合金MIG堆焊工艺参数优化[J]. 热加工工艺, 2020, 49(15): 114 - 118.

- [6] 胡晓岗. 电弧堆焊成型复合填充路径规划研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [7] Diourté A, Bugarin F, Bordreuil C, et al. Continuous three-dimensional path planning (CTPP) for complex thin parts with wire arc additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2021, 37: 101622.
- [8] Lei T, Rong Y, Xu J, et al. Experiment study and regression analysis of molten pool in laser welding[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 108: 534 – 541.
- [9] Nalajam P K, Varadarajan R. Experimental and theoretical investigations on cold metal transfer welds using neural networks: a computational model of weld geometry[J]. Experimental Techniques, 2021, 45(6): 705 – 720.
- [10] Zhao D, Bezgans Y, Vdonin N, et al. Modeling and optimization of weld bead profile with varied welding stages for weathering steel A606[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116(9-10): 3179 – 3192.
- [11] 陈喆, 彭勇, 孔见, 等. CMT工艺对铝合金焊道尺寸的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(7): 128 – 132.
- [12] 朱志明, 范开果, 王永东. 自保护药芯焊丝熔化速度模型及其影响因素[J]. 焊接, 2014(9): 2 – 6.

第一作者: 吴超群, 博士, 教授; 主要从事机器人焊接工艺及自动化设备研究与开发; Chaoqunwu@whut.edu.cn  
 通信作者: 雷艇, 博士, 博士后; 主要从事机器人焊接工艺、焊缝跟踪研究; leiting0621@whut.edu.cn.

(编辑: 曲畅)

本文引用格式:

吴超群, 顾世阳, 雷艇, 等. 电弧堆焊参数对焊道形貌的影响规律[J]. 焊接, 2023(2): 17 – 23.

Wu Chaoqun, Gu Shiyang, Lei Ting, et al. The influence of arc surfacing parameters on weld bead morphology[J]. Welding & Joining, 2023(2): 17 – 23.

欢迎订阅

焊接杂志社



《焊接学报》(月刊)

邮发代号14—17

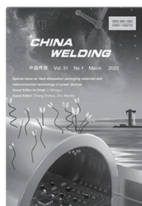
美国《工程索引》(Ei) 美国《化学文摘》(CA)  
中国精品科技期刊 RCCSE中国权威学术期刊



《焊接》(月刊)

邮发代号14—45

创刊早(1957)、发行量大、影响面广的技术类期刊  
中文核心期刊 中国科技核心期刊



《CHINA WELDING》(季刊)

邮发代号14—325

美国《化学文摘》(CA) 俄罗斯《文摘杂志》(AJ)  
荷兰文摘与引文数据库Scopus  
日本科学技术振兴机构中国文献数据库JST



《机械制造文摘—焊接分册》(双月刊)

邮发代号14—192

国家级技术类期刊  
中国核心期刊(遴选)数据库 中国学术期刊网络出版总库  
中文科技期刊数据库



1 邮局订阅

2 杂志社订阅

3 微信订阅



广告