

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.04.02

# 316L不锈钢MIG电弧增材制造中焊道成形尺寸的关键影响因素及优化策略

李子葳<sup>1</sup>, 杨洪才<sup>2</sup>, 刘浩民<sup>1</sup>, 孙俊华<sup>1</sup>, 张元彬<sup>1\*</sup>

1. 山东建筑大学 材料科学与工程学院, 山东 济南 250101

2. 山东济容热工科技有限公司, 山东 济南 250100

**摘要:** 为探讨316L不锈钢MIG电弧增材制造中不同电流模式下的工艺参数对焊道成形尺寸的影响。首先通过控制变量法研究了恒流模式下基板温度、焊接电流、焊接速度及线能量对焊道成形尺寸的影响规律;其次,采用正交试验法研究了脉冲电流下焊接电流、焊接速度、占空比和脉冲频率对焊道成形尺寸的影响,利用多元线性回归方法构建脉冲电流下工艺参数(焊接电流、焊接速度、占空比、脉冲频率)与焊道熔宽和余高尺寸预测模型。结果显示:在恒流模式下,焊接电流为150 A,焊接速度为4 mm/s,基板温度控制在100~150 °C时,成形形貌较好;在脉冲电流下,焊接电流为140 A、焊接速度为5 mm/s、占空比为0.8、脉冲频率为3 Hz时焊道成形效果最佳。线能量大于7 242 J/cm时成形效果较差。此外,建立了脉冲电流下工艺参数与焊道熔宽和余高的多元线性回归模型,经验证该回归模型能够准确预测焊道成形尺寸。

**关键词:** 电弧增材制造; 工艺参数; 成形质量; 回归模型

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)04-0013-10

## Key Influencing Factors and Optimization Strategies for Weld Bead Formation Size in 316L Stainless Steel MIG Arc Additive Manufacturing

LI Ziwei<sup>1</sup>, YANG Hongcai<sup>2</sup>, LIU Haomin<sup>1</sup>, SUN Junhua<sup>1</sup>, ZHANG Yuanbin<sup>1\*</sup>

1. School of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China

2. Shandong Jirong Thermal Technology Co., Ltd., Ji'nan 250100, China

**Abstract:** The study aims to investigate the impact of process parameters under different current modes on the weld bead formation size in 316L stainless steel MIG arc additive manufacturing. Firstly, the control variable method was used to study the influence of base plate temperature, welding current, welding speed, and line energy on the weld bead formation size under constant current mode. Subsequently, the orthogonal test method was employed to study the impact of welding current, welding speed, duty cycle, and pulse frequency on the weld bead formation size under pulsed current, and a multiple linear regression method was utilized to construct a predictive model of process parameters (welding current, welding speed, duty cycle, pulse frequency) and weld bead dimensions (melt width and residual height). The results showed that under the constant current mode, the formation morphology was better when the welding current was 150 A, the welding speed was 4 mm/s, and the base plate temperature was controlled between 100~150°C. Under the pulsed current mode, the best weld bead formation was achieved with a welding current of 140 A, welding speed of 3 mm/s, duty cycle of 0.8, and pulse frequency of 3 Hz. The formation effect was poorer when the line energy exceeded 7 242 J/cm. Additionally, a multiple linear regression model for the process parameters and the weld bead dimensions (melt width and residual height) under pulsed current was established, and the regression model was verified to accurately predict the weld bead formation size.

收稿日期: 2023-09-14 修回日期: 2023-10-07

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2020ME152)

作者简介: 李子葳(1998—),男,硕士研究生,主要从事增材制造的研究。

通讯作者: 张元彬(1970—),男,博士,教授,主要从事焊接冶金及工艺、增材制造等研究。E-mail: 12251@sdju.edu.cn。

**Keywords:** arc additive manufacturing; technological parameter; forming quality; regression model

**引用格式:**李子葳,杨洪才,刘浩民,等. 316L 不锈钢 MIG 电弧增材制造中焊道成形尺寸的关键影响因素及优化策略[J]. 电焊机, 2024, 54(4): 13–22.

**Citation:**LI Ziwei, YANG Hongcai, LIU Haomin, et al. Key Influencing Factors and Optimization Strategies for Weld Bead Formation Size in 316L Stainless Steel MIG Arc Additive Manufacturing[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4): 13–22.

## 0 引言

增材制造技术(AM)也被称为“3D 打印”,与传统的“减材制造技术”相对。它通过对制造模型扫描或利用 CAD 等绘图工具建立零件的三维模型,按照预定路径层层堆叠,直至零件成形<sup>[1–4]</sup>。相较于传统的锻造、机械加工等制造技术,AM 具有许多优势,如无需使用刀具和磨具、原材料利用率高、制造周期短、可实现复杂结构制造等。因此,在航天和医疗等领域有较广泛的应用<sup>[5]</sup>。自 2015 年开始,我国已把增材制造产业发展水平提高至我国的战略层次,并出台了《国家增材制造产业发展推进计划(2015–2016 年)》。此后,国家从技术创新和行业标准等多个方面规范增材制造产业,促进和推动了增材制造的快速发展<sup>[6–7]</sup>。

电弧增材制造技术(WAAM)采用电弧作为能量源,通过逐层向上进行堆焊的方式,加工制造构件,该技术是在 PAW、MIG、TIG 等焊接技术的基础上改善发展而来,金属件由全焊缝组成,其材料的组成成分均匀、致密度较高<sup>[8]</sup>。相较于激光、电子束等高能束增材制造技术,电弧增材制造技术最大的优点在于能实现多种材料的混合制作,在制作结构复杂、大尺寸的构件时所需成本较低、效率高成形快且对环境的污染小,在成形过程中可实现局部保护无需密封舱保护(部分金属除外),同时材料使用率高,节约成本<sup>[9–11]</sup>。

伴随着科技的迅速进步和焊接机器人的广泛普及与应用,电弧增材制造生产效率高、应用范围广等优点愈加凸显。潘宇<sup>[12]</sup>研究发现 GH4169 高温合金焊丝电弧增材制造技术参数对单道多层熔覆高度有影响,随着送丝速度的升高,焊道层宽呈现出前期升高后期降低的趋势;Sada<sup>[13]</sup>等人研究了焊接电流、电压、焊接转速对熔深和熔宽的影响,并构建了数学模型进行分析,焊接电流密度的变化对熔

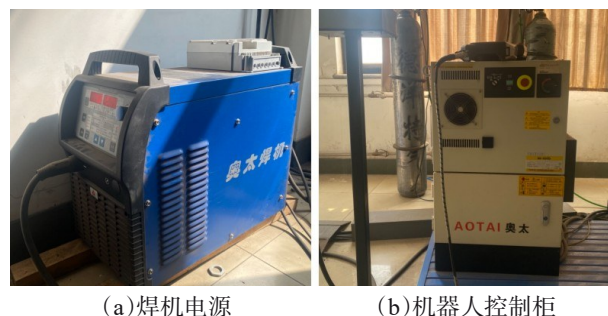
深和熔宽的影响最为显著;张田<sup>[14]</sup>等人探讨了 CMT 电弧增材生产中焊接方式对电弧增材生产成形的作用,随着焊道夹角角度的增加,夹角处焊道的最大宽度和高度会降低。

虽然近年来电弧增材制造的研究有了较多进展,但仍存在着成形精度低、稳定性和宏观形貌较差的问题。基于上述情况,本文探讨了不同电流下多种工艺参数对电弧增材制造成形件尺寸的影响,并建立回归模型实现对焊道尺寸准确预测。

## 1 设备与试验方案

### 1.1 材料与设备

试验设备选用 FANUC Robot M-10iD/12 六轴机器人,使用 FANUC SYSTEM R-30iB 机器人控制柜实现对机器人的控制,使用变位机实现对基板位置的调整,使用 HT-8879 红外测温仪测量温度,如图 1 所示。



(a)焊机电源 (b)机器人控制柜



(c)六轴机器人变位机

图1 电弧增材制造平台

Fig. 1 Arc additive manufacturing platform

试验基板选用 310 mm×130 mm×6 mm 的 304 不锈钢,焊丝选用直径为 1.2 mm 的 316L 不锈钢焊丝,其化学成分见表 1、表 2。焊接试验前,采用砂纸打磨基板表面,清理油污。保护气体选用高纯度氩气,保护气体流量为 15 L/min。

表 1 316L 不锈钢焊丝化学成分(质量分数,%)

| Table 1 Composition table of 316L stainless steel welding wire (wt. %) |     |     |       |        |    |    |         |
|------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-------|--------|----|----|---------|
| C                                                                      | Si  | Mn  | S     | P      | Cr | Ni | Mo      |
| 0.023                                                                  | 0.7 | 1.6 | ≤0.03 | ≤0.045 | 19 | 12 | 2.0~3.0 |

表 2 304 不锈钢基板化学成分(质量分数,%)

| Table 2 Composition table of 304 stainless steel substrate (wt. %) |     |    |       |        |    |     |    |
|--------------------------------------------------------------------|-----|----|-------|--------|----|-----|----|
| C                                                                  | Si  | Mn | S     | P      | Cr | Ni  | Mo |
| 0.08                                                               | 0.7 | 2. | ≤0.03 | ≤0.045 | 20 | 8.5 | -  |

1.2 试验方案

研究焊接参数对焊道成形的影响常用的方法有控制变量法和正交试验法。控制变量法具有简单易行、直观性强的特点,通过改变单一变量,可以直观地观察到因变量的变化情况,有利于分析各个因素对试验结果的影响;正交试验法有均匀分散、整齐可比的特点,通过较少的试验次数得出各变量对试验结果的主次影响。本文采用控制变量法设计了恒流模式下的单层单道焊接试验来分析基板温度、焊接速度、焊接电流、线能量对焊道成形尺寸的影响规律,工艺参数的选择范围如表 3 所示;采用正交试验法设计了 4 因素 4 水平正交试验来研究脉冲模式下焊接峰值电流、焊接速度、脉冲频率、占空比对焊道成形尺寸的影响效果,4 因素 4 水平试验表如表 4 所示。

表 3 控制变量法焊接参数及选择范围

| Table 3 Welding parameters and selection range of control variable method |                      |                                  |                             |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| 焊接速度<br>$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$                                 | 焊接电流<br>$I/\text{A}$ | 线能量<br>$/(J\cdot\text{cm}^{-1})$ | 基板温度<br>$/^{\circ}\text{C}$ |
| 2~6                                                                       | 130~170              | 4 352~9 828                      | 28.6~173.8                  |

实验开始前,将基板放置在变位机工作台上,并用夹板将基板四边夹紧,防止焊接过程中基板受热变形。为了保证焊接的连续性和测量的方便性,在每条焊道开始焊接前,使用 HT-8879 红外测温仪测量其起弧端、熄弧端以及焊道中心点的温度,计算其平均值即为该焊道基板温度。焊道截面如图 2 所示,其中  $W$  为焊道熔宽, $H$  为焊道余高,为了精确

表 4 4 因素 4 水平正交试验表

Table 4 4 factors 4 horizontal orthogonal test table

| 序号 | 焊接电流<br>$I/\text{A}$ | 焊接速度<br>$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$ | 占空比<br>$k$ | 频率<br>$f/\text{Hz}$ |
|----|----------------------|-------------------------------------------|------------|---------------------|
| 1  | 120                  | 2                                         | 0.2        | 1                   |
| 2  | 120                  | 3                                         | 0.4        | 2                   |
| 3  | 120                  | 4                                         | 0.6        | 3                   |
| 4  | 120                  | 5                                         | 0.8        | 4                   |
| 5  | 130                  | 2                                         | 0.4        | 3                   |
| 6  | 130                  | 3                                         | 0.2        | 4                   |
| 7  | 130                  | 4                                         | 0.8        | 1                   |
| 8  | 130                  | 5                                         | 0.6        | 2                   |
| 9  | 140                  | 2                                         | 0.6        | 4                   |
| 10 | 140                  | 3                                         | 0.8        | 3                   |
| 11 | 140                  | 4                                         | 0.2        | 2                   |
| 12 | 140                  | 5                                         | 0.4        | 1                   |
| 13 | 150                  | 2                                         | 0.8        | 2                   |
| 14 | 150                  | 3                                         | 0.6        | 1                   |
| 15 | 150                  | 4                                         | 0.4        | 4                   |
| 16 | 150                  | 5                                         | 0.2        | 3                   |

测量焊道的熔宽和余高,本文选取焊道成形形貌均匀的 3 处位置分别测量,取平均值即为该焊道的成形尺寸。

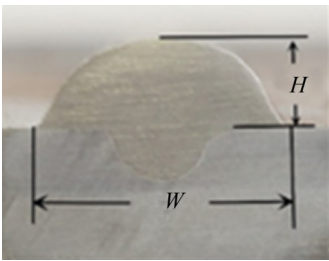


图 2 焊道截面

Fig. 2 Cross section of welding pass

2 结果与分析

2.1 恒流模式工艺参数对焊道成形的影响

2.1.1 基板温度对焊道成形的影响

图 3 为基板温度与焊道的熔宽、余高尺寸关系。可以看出,随着基板温度的升高,焊道熔宽逐渐增大,余高逐渐减小。这是因为随着基板温度升高,熔池金属的流动性会增强,表面张力会减小,从而导致焊道熔宽增大、余高减小。

基板温度升高对焊道熔宽和余高的影响并非线性关系,随着基板温度升高,焊道余高和熔宽的

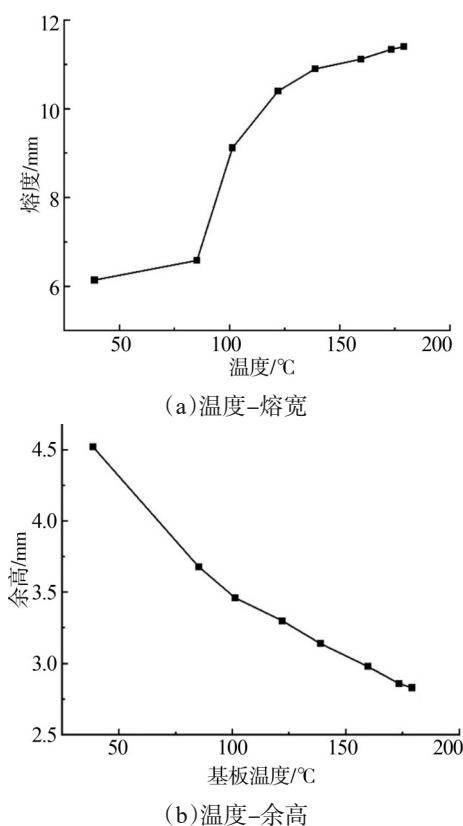


图3 基板温度与焊道尺寸关系

Fig. 3 Relationship between substrate temperature and weld size

变化趋势逐渐减小,100 °C以上时熔宽和余高变化率变小。在101.2 °C焊道熔宽和余高相较于85.1 °C下的变化率分别为38.6%和6.3%,而在173.4 °C时相较于159.6 °C时的变化率仅为4.2%和2%。

从上述结果可以看出,基板温度对单层焊道具有较大影响。这是因为多层焊时,墙体的层层堆积会加剧热积累导致增材过程稳定性变差,使成形件的成形精度降低。

下面进一步讨论基板温度对单道多层焊道的影响。墙体层数为6层,各层冷却时间均为60 s,采用往复焊的焊接方式进行焊接。图4为基板温度为167 °C的墙体形貌,图5为基板温度与墙体的宽度、高度尺寸关系。



图4 167 °C墙体形貌

Fig. 4 Morphology of wall at 167°C

由图4可知,当基板温度为167 °C时,墙体的中间位置出现了“混层”的现象,且靠近墙体两端出现

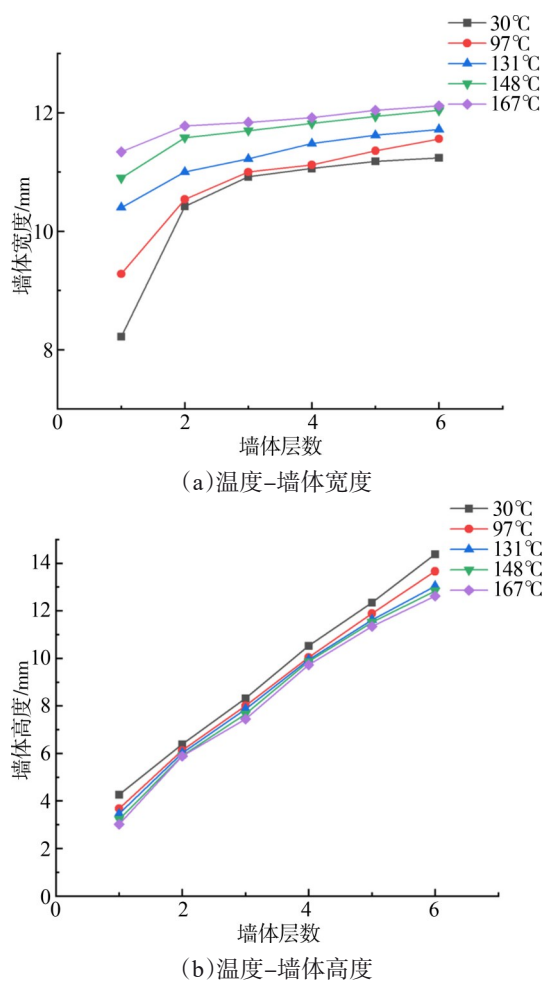


图5 基板温度与墙体尺寸关系

Fig. 5 Relationship between substrate temperature and wall size

了流淌的现象。分析认为,由于基板温度较高,导致焊缝的散热速率较慢,使层间热量积累,部分金属液未及时凝固,出现流淌现象,使墙体侧表面成形质量下降。由图5可知,不同基板温度对多层焊道尺寸的影响与单层焊道相似,第1、2层焊道宽度受基板温度的影响较大,第3层之后焊道宽度变化率较小;墙体的高度受基板温度变化影响较小。

综上,适当的基板温度有助于提高焊道的成形质量和尺寸稳定性。经过试验对比发现,当基板温度在140 °C左右时,焊道宏观形貌较好。所以,电弧增材制造时可将基板预热100~150 °C

#### 2.1.2 焊接电流对焊道成形的影响

图6为不同焊接电流下单层单道焊道的形貌。图7为焊接电流与焊道的熔宽、余高尺寸的关系。保持基板温度为140 °C,焊接速度为5 mm/s不变。



图6 不同焊接电流下的焊道形貌

Fig. 6 Morphology of weld bead under different welding current

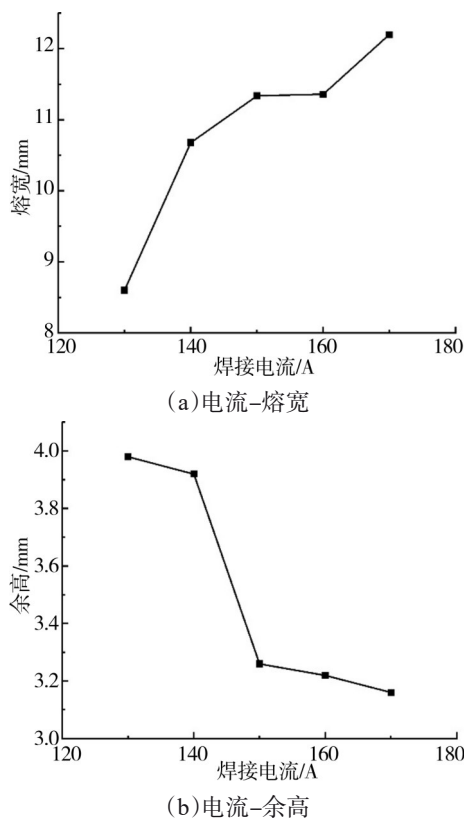


图7 焊接电流与焊道尺寸关系

Fig. 7 Relationship between welding current and weld size

由图7可以看出,电流在130~170 A范围时,随着电流增加,焊道熔宽逐渐增大,余高逐渐减小。主要原因是:焊接电流的增大导致电弧力上升,热输入量上升,焊丝的熔化量上升,使熔化金属的铺展面积增大,焊道熔宽增加,余高降低。当使用较小的焊接电流时,易出现焊接电弧不稳定的现象,焊道成形不均匀,如图6中电流为140 A的焊道。而当焊接电流过大时,熔池金属温度高,易流淌,余高小,成形效率低,并且成形过程中会产生较多的飞溅,影响成形稳定性及材料利用率。经对比发现,在焊接电流为150 A时,焊道的整体成形较好。

下面进一步讨论焊接电流对单道多层焊道的

影响。墙体层数为20层,各层冷却时间均为60 s,采用往复焊的焊接方式进行焊接。定义墙体的表面高度差为墙体厚度与墙体两端的最大高度差。

图8分别为130 A、170 A的墙体形貌,图9为焊接电流与墙体厚度、表面最大高度差的关系。



图8 130 A、170 A的墙体形貌

Fig. 8 Wall topography of 130 A and 170 A

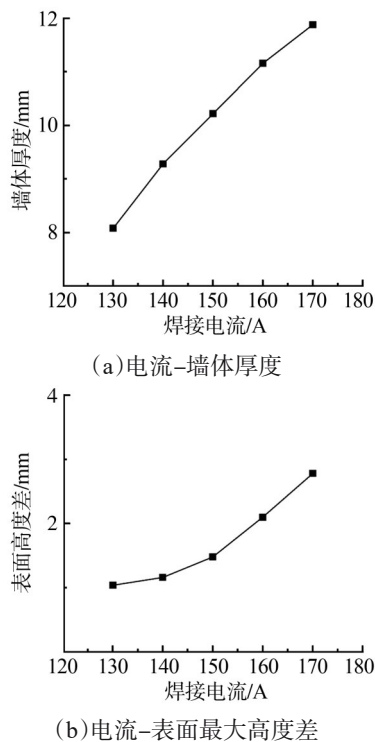


图9 焊接电流与墙体尺寸关系

Fig. 9 Relationship between welding current and wall size

由图8可以看出,焊接电流为130 A的墙体侧表面比170 A的平整,且从图8b可以发现,170 A的墙体侧表面下塌严重,成形较差。这是因为当焊接电流较大时,输入的热量较多,熔融的金属来不及凝固,下一层焊道受到上一层的重熔作用,使墙体表面金属流淌现象严重。

由图9可以看出,墙体厚度和墙体表面高度差随着焊接电流的增大而增加,表面高度差的变化趋

势逐渐增大。这是因为随着电流的增大,墙体收到的热量增大,表面出现流淌现象,且电流越大流淌现象越严重,导致墙体的表面高度差越大。

### 2.1.3 焊接速度对焊道成形的影响

实验过程中,保持基板温度为  $140^{\circ}\text{C}$ 。图 10 为焊接速度与焊道的熔宽、余高尺寸的关系。从图中可以看出,随着焊接速度的增加,焊道熔宽和余高都逐渐减小,且熔宽的下降趋势相比余高更为明显,这说明焊接速度对焊道熔宽变化的影响更大。

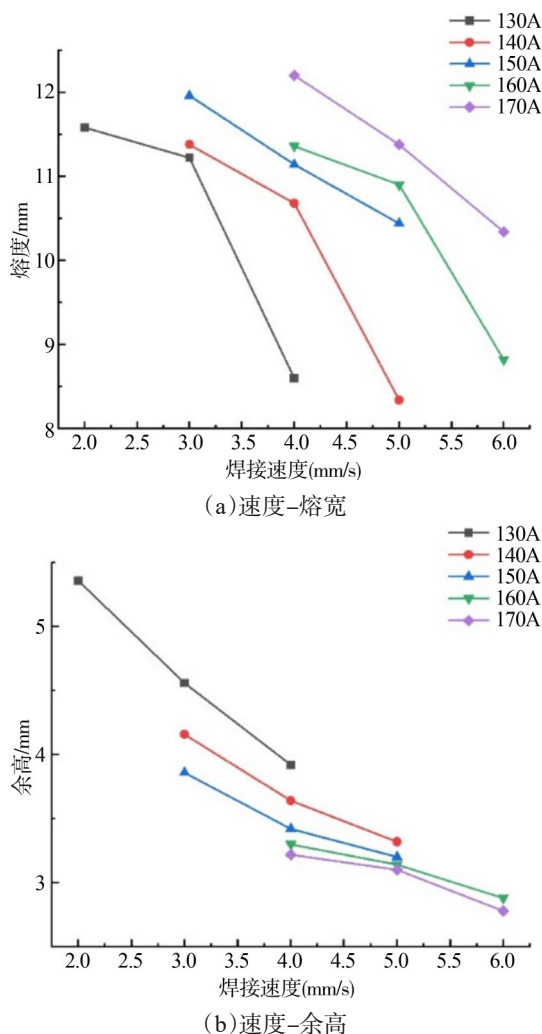


图 10 焊接速度与焊道尺寸关系

Fig. 10 Relationship between welding speed and weld size

下面进一步讨论焊接速度对单道多层焊道的影响。实验开始时中设定焊接电流为 150 A, 基板温度为  $140^{\circ}\text{C}$ 。焊接速度分别为  $7\text{ mm/s}$  和  $3\text{ mm/s}$  的墙体形貌如图 11 所示, 图 12 为焊接电流与墙体厚度、表面最大高度差的关系。

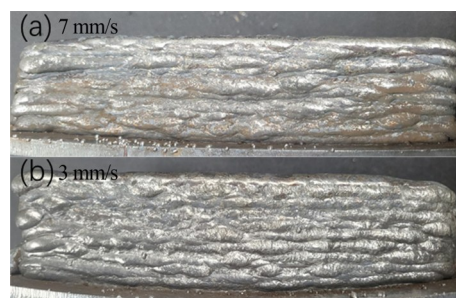


图 11 不同焊接速度墙体形貌

Fig. 11 Different welding speed wall morphology

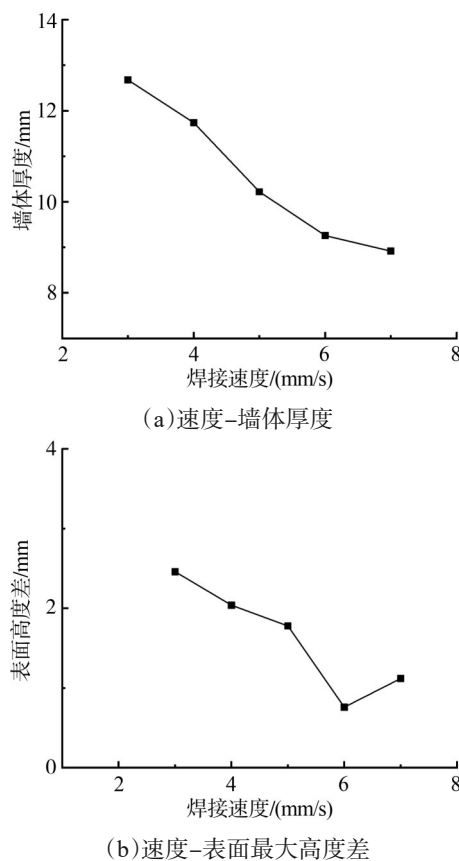


图 12 焊接速度与墙体尺寸关系

Fig. 12 Different welding speed wall morphology

由图 11 可以看出,焊接速度为  $7\text{ mm/s}$  的墙体与焊接速度为  $3\text{ mm/s}$  的墙体相比,表面更平整,层间结合紧密,表面中间部分流淌程度减轻,但是墙体两端仍出现下塌现象。由图 12 可知,墙体厚度随焊接速度增大而减小,这是因为在焊接速度较低时,送丝速度不变,焊道金属的沉积量增加,散热率降低,熔融金属的流动性强,向墙体两侧流淌,使成形质量降低。由图 12 可知,墙体表面高度差随焊接速度增加整体呈下降趋势,但是在焊接速度为  $7\text{ mm/s}$

时出现了上升的趋势。分析认为,由于焊接速度过大导致焊接时电弧不稳定,在起弧、熄弧点附近易出现下塌、焊瘤等缺陷,同时焊接电流不稳定会导致焊接过程中出现飞溅现象(见图 11a)。综上,当焊接电流 150 A、焊接速度 6 mm/s 时成形最好。

#### 2.1.4 线能量( $\eta=80\%$ )对焊道成形的影响

不同线能量下焊道的熔宽和余高尺寸变化如图 13 所示。可以看出,当线能量较低时,焊道余高和熔宽都较小且焊道成形不均匀。随着线能量的增加,焊道余高和熔宽会逐渐增大。但当线能量大于 7 242 J/cm 时,焊道余高出现了下降的趋势,这是因为过大的线能量导致熔池过热,导致焊道塌陷,使余高变小。

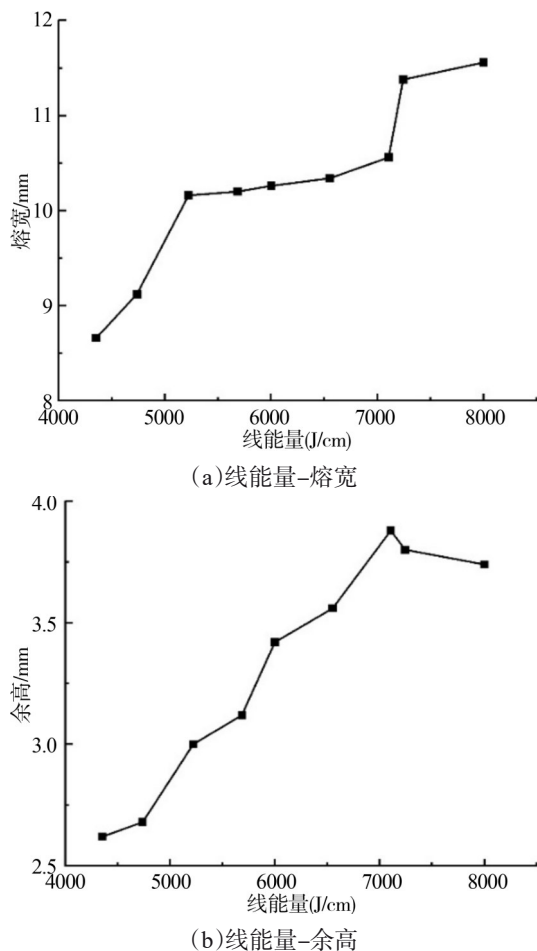


图 13 线能量与焊道尺寸关系

Fig. 13 Relationship between line energy and wall size

下面进一步讨论线能量对单道多层焊道的影响。基板温度为 140 °C,线能量为 8 000 J/cm 的墙体形貌如图 14 所示,图 15 为线能量与墙体厚度、表

面最大高度差的关系。



图 14 线能量 8 000 J/cm 墙体形貌

Fig. 14 Line energy 8 000 J/cm wall morphology

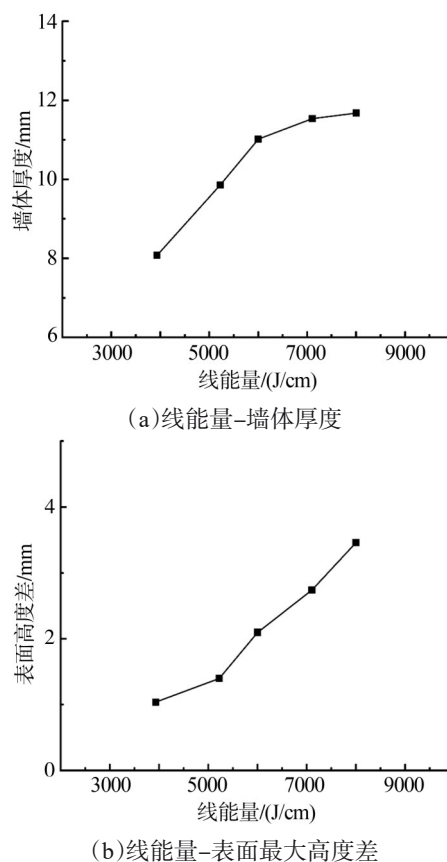


图 15 线能量与墙体尺寸关系

Fig. 15 Relationship between line energy and wall size

由图 15 可以看出,墙体厚度随着线能量的增大而增大,墙体表面高度差随线能量的增大而增大。且墙体厚度的变化趋势逐渐减小,由最高 18% 减小到 6%,由图 14 可以看出线能量为 8 000 J/cm 时墙体流淌现象严重,表面成形不均匀,成形质量较差。

## 2.2 脉冲电流下工艺参数对焊道成形的影响

### 2.2.1 极差分析

表 5 为熔宽极差分析表,表 6 为余高极差分析表。 $k_i$ 代表该因素在水平  $i$  的情况下的试验结果之和,正交试验结果中极差值  $R$  越大,说明该因素对实验结果的影响程度越大。由于第 13 组试验焊道出

现流淌、焊穿现象,成形效果较差,其结果不使用。

由表5可知,4种工艺参数对脉冲电流下焊道熔宽的影响程度为:焊接速度>脉冲频率>占空比>焊接电流;由表6可知,4种工艺参数对脉冲电流下焊道余高的影响程度为:焊接速度>焊接电流>占空比>脉冲频率。综上可知,在脉冲电流下焊道的最佳工艺参数为:焊接电流140 A,焊接速度5 mm/s,占空比0.8,脉冲频率3 Hz。

表5 熔宽极差分析

| Table 5 Melting width range analysis table |            |                                |                 |             |
|--------------------------------------------|------------|--------------------------------|-----------------|-------------|
| 项                                          | 焊接电流<br>/A | 焊接速度<br>/(mm·s <sup>-1</sup> ) | 占空比<br><i>k</i> | 脉冲频率<br>/Hz |
| <i>k</i> <sub>1</sub>                      | 32.26      | 34.58                          | 32.68           | 37.58       |
| <i>k</i> <sub>2</sub>                      | 39.34      | 38.90                          | 37.78           | 23.42       |
| <i>k</i> <sub>3</sub>                      | 39.86      | 34.96                          | 40.24           | 41.38       |
| <i>k</i> <sub>4</sub>                      | 29.8       | 32.82                          | 30.56           | 38.88       |
| <i>R</i>                                   | 1.9        | 3.322                          | 2.017           | 2.538       |

表7 焊道熔宽线性回归分析

| Table 7 Residual height range analysis table |        |       |       |        |       |       |                |                   |                   |
|----------------------------------------------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|----------------|-------------------|-------------------|
| 因素                                           | B      | 标准误差  | Beta  | t      | P     | VIF   | R <sup>2</sup> | 调整 R <sup>2</sup> | F                 |
| 常数                                           | -0.924 | 3.587 | —     | -0.258 | 0.802 | —     |                |                   |                   |
| 焊接电流 <i>I</i> /A                             | 0.091  | 0.026 | 0.5   | 3.543  | 0.005 | 1.049 |                |                   |                   |
| 占空比 <i>k</i>                                 | 4.937  | 1.289 | 0.54  | 3.831  | 0.003 | 1.049 | 0.81           | 0.734             | F=10.668, P=0.001 |
| 焊接速度 <i>v</i> /(mm/s)                        | -1.315 | 0.258 | -0.72 | -5.103 | 0.000 | 1.049 |                |                   |                   |
| 脉冲频率 <i>f</i>                                | 0.185  | 0.239 | 0.107 | 0.775  | 0.456 | 1.008 |                |                   |                   |

表8 焊道余高线性回归分析

| Table 8 Linear regression analysis of pass height |        |       |        |        |       |       |                |                   |                   |
|---------------------------------------------------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|----------------|-------------------|-------------------|
| 因素                                                | B      | 标准误差  | Beta   | t      | P     | VIF   | R <sup>2</sup> | 调整 R <sup>2</sup> | F                 |
| 常数                                                | 1.182  | 1.136 | —      | 1.041  | 0.322 | —     |                |                   |                   |
| 焊接电流 <i>I</i> /A                                  | 0.034  | 0.008 | 0.521  | 4.189  | 0.002 | 1.049 |                |                   |                   |
| 占空比 <i>k</i>                                      | 1.42   | 0.408 | 0.432  | 3.478  | 0.006 | 1.049 | 0.853          | 0.794             | F=14.476, P=0.000 |
| 焊接速度 <i>v</i> /(mm/s)                             | -0.54  | 0.082 | -0.822 | -6.615 | 0.000 | 1.049 |                |                   |                   |
| 脉冲频率 <i>f</i>                                     | -0.051 | 0.076 | -0.082 | -0.670 | 0.518 | 1.008 |                |                   |                   |

表7、表8中B表示各因素的回归系数,可知焊接速度与焊道熔宽呈现负相关性,焊接速度和脉冲频率与焊道余高呈现负相关性。由此可得焊道熔宽和余高的线性回归方程分别为:

$W=-0.924+0.091I-1.315v+4.937k+0.185f$  (1)

$H=1.182+0.034I-0.54v+1.42k-0.051f$  (2)

由表7、表8可知,焊道熔宽和余高的回归方程显著性P<0.01,水平上呈现显著性,说明该方程中输入变量与输出值存在显著的线性关系;且模型的VIF值均小于5,说明回归模型没有共线性问题,模

表6 余高极差分析

| Table 6 Analysis table of residual high range |            |                                |                 |             |
|-----------------------------------------------|------------|--------------------------------|-----------------|-------------|
| 项                                             | 焊接电流<br>/A | 焊接速度<br>/(mm·s <sup>-1</sup> ) | 占空比<br><i>k</i> | 脉冲频率<br>/Hz |
| <i>k</i> <sub>1</sub>                         | 15.78      | 15.42                          | 15.76           | 18.18       |
| <i>k</i> <sub>2</sub>                         | 17.66      | 18.34                          | 18.28           | 11.82       |
| <i>k</i> <sub>3</sub>                         | 18.30      | 16.86                          | 18.28           | 18.10       |
| <i>k</i> <sub>4</sub>                         | 13.86      | 14.98                          | 13.28           | 17.50       |
| <i>R</i>                                      | 0.675      | 1.395                          | 0.63            | 0.605       |

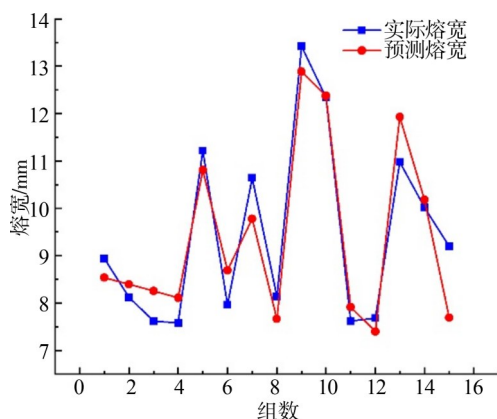
2.2.2 回归模型的建立与检验

为了得到更精确的焊接工艺参数对成形件熔宽、余高的成形规律,定量说明工艺参数对焊道成形质量的影响。本文利用SPSSPRO软件对焊道熔宽*W*和余高*H*进行线性拟合,建立回归模型。使用最小二乘法求得焊道熔宽和余高的多元回归方程式为并对其进行线性回归分析。表7、表8分别为对焊道熔宽和余高的线性回归分析。

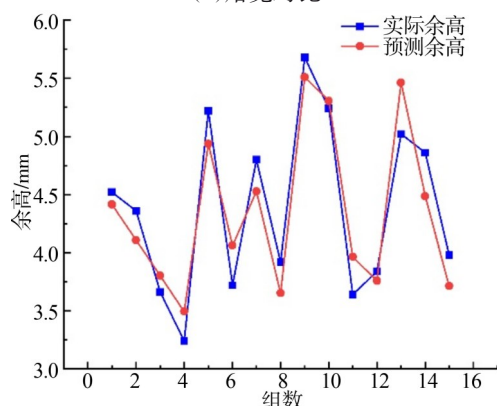
型构建良好;模型的R<sup>2</sup>分别为0.81、0.853,接近于1,说明回归直线与该模型的线性拟合程度较好。模型中焊接电流*I*、占空比*k*、焊接速度*v*的P值均小于0.01,说明以上因素对熔宽和余高具有显著的影响。

焊道熔宽和余高的实际值与预测值的拟合曲线对比如图16所示,可以看出实际值与预测值曲线较吻合,该回归模型能够较好地预测焊道熔宽和余高尺寸。

预测误差如图17所示。由图17可知,焊道余高的误差率均保持在10%之内,焊道熔宽的误差率



(a) 熔宽对比



(b) 余高对比

图16 预测结果对比

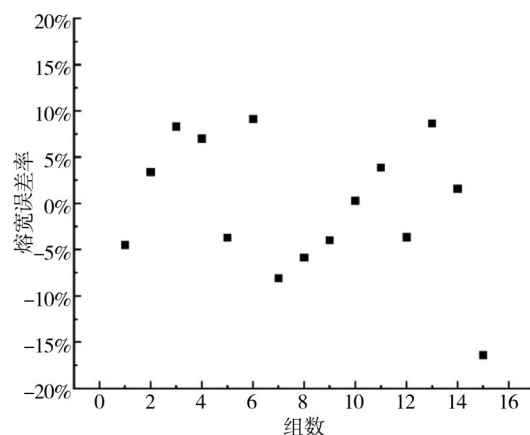
Fig. 16 Comparison of prediction results

除第15组为16.4%外,均在10%以内,且集中在5%附近。分析认为第15组实验由于焊接电流、焊接速度过大而占空比较小,导致焊接时电流不稳定成形较差,造成一定误差。总体而言,回归模型误差率小,预测精度高,结果稳定,可以应用于增材制造。

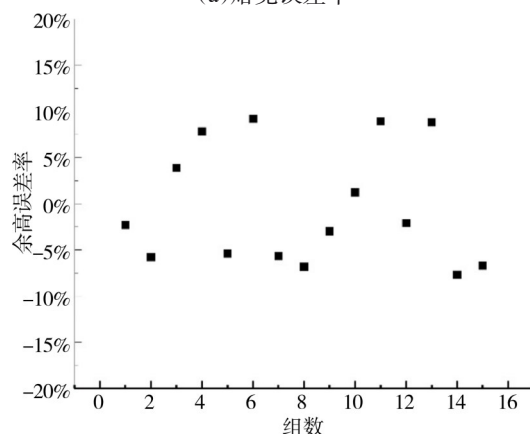
### 3 结论

(1)对于恒流源316L不锈钢焊丝的电弧增材制造,当基板温度为140℃、焊接电流为150A、焊接速度为4mm/s,焊道成形效果较好;基板温度小于150℃时对单道多层焊道成形尺寸影响较小,焊接电流为150A,焊接速度为6mm/s时的多层多道焊道成形较好。

(2)在脉冲电流下工艺参数对单层焊道熔宽的影响程度为:焊接速度>脉冲频率>占空比>焊接电流;对单层焊道余高的影响程度为:焊接速度>焊接



(a) 熔宽误差率



(b) 余高误差率

图17 预测误差

Fig. 17 Prediction error chart

电流>占空比>脉冲频率。在脉冲电流下焊道的最佳工艺参数为:焊接电流140A,焊接速度5mm/s,占空比0.8,脉冲频率3Hz。

(3)建立的多元线性回归方程能准确且有效地预测成形试件焊道熔宽与余高,对预测脉冲电流下焊道成形尺寸具有积极的意义。

### 参考文献:

- [1] 何建斌,许燕,周建平,等.金属增材制造技术的研究进展[J].机床与液压,2020,48(02):171-175.  
HE J B, XU Y, ZHOU J P, et al. Research Progress of Additive Manufacturing Technology for Metal[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(2): 171-175.
- [2] 李方正.中国增材制造产业发展及应用情况综述[J].工业技术创新,2017,04(04):1-5.  
LI F Z. Overview of the development and application of additive manufacturing industry in China[J]. Industrial Technology Innovation, 2017, 04(04): 1-5.

- [3] 张衡,杨可. 增材制造的现状与应用综述[J]. 包装工程, 2021, 42(16): 9-15.  
ZHANG H, YANG K. Summary of current situation and application of additive manufacturing [J]. Packaging Engineering, 2021, 42(16): 9-15.
- [4] Ngo T D, Kashani A, Imbalzano G, et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges [J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 143: 172-196.
- [5] 顾冬冬,张红梅,陈洪宇,等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 24-47.  
GU D D, ZHANG H M, CHEN H Y, et al. Laser Additive Manufacturing of High-Performance Metallic Aerospace Component [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 24-47.
- [6] 国务院. 国务院关于印发“十三五”国家科技创新规划的通知: 国发〔2016〕43号 [A/OL]. (2016-07-28) [https://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content\\_5103134.htm?\\_qId=eeb316020006f9570000000364979daa](https://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5103134.htm?_qId=eeb316020006f9570000000364979daa).
- [7] 于灏. “中国制造2025”下的3D打印[J]. 新材料产业, 2015(07): 20-27.  
YU Y. 3D printing under "Made in China 2025" [J]. Advanced Materials Industry, 2015(07): 20-27.
- [8] Kumar C H B, Anandakrishnan V. Experimental investigations on the effect of wire arc additive manufacturing process parameters on the layer geometry of Inconel 825 [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 21: 622-627.
- [9] Cunningham C R, Flynn J M, Shokrani A, et al. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing [J]. Engineering Structures Additive Manufacturing, 2018, 22: 672-686.
- [10] 关彦齐,王芳芳. 浅析3D打印的现状与前景[J]. 科学技术创新, 2020(18): 78-79.  
GUAN Y Q, WANG F F. Analysis of the status quo and prospect of 3D printing [J]. Science and technology innovation, 2020(18): 78-79.
- [11] 王世杰,王海东,罗锋. 基于电弧的金属增材制造技术研究现状[J]. 金属加工(热加工), 2018(1): 19-22.  
WANG S J, WANG H D, LUO F. Research status of metal additive manufacturing technology based on arc [J]. Machinist Metal Forming, 2018(1): 19-22.
- [12] 潘宇. 电弧增材焊道成形建模及预测技术研究[D]. 江苏: 江南大学, 2022.  
PAN Y. Research on modeling and prediction technology of arc additive bead forming [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
- [13] Sada O O, Achebo J. Optimisation and prediction of the weld bead geometry of a mild steel metal inert gas weld [J]. Advances in Materials and Processing Technologies, 2020(4): 1-10.
- [14] 张田. 不锈钢复杂结构CMT电弧增材成形工艺及组织性能研究[D]. 辽宁: 沈阳工业大学, 2022.  
ZHANG T. Study on CMT arc additive forming technology and microstructure properties of complex stainless steel structures [D]. Liaoning: Shenyang University of Technology, 2022.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>