

机器人CMT-P焊接参数对4043铝合金焊缝成形影响的试验研究

刘双耀¹, 卢煜成², 程文锋¹, 王瑞权^{1, 3}, 王伟², 高建森³

1. 浙江机电职业技术大学 浙江杭州 310053

2. 浙江理工大学 浙江杭州 310018

3. 杭州吉利汽车有限公司 浙江杭州 311228

摘要: 基于机器人CMT-P焊接工艺, 采用L9 (3⁴) 正交试验法, 针对4043铝合金设计了机器人CMT-P焊接参数试验, 并利用极差分析和方差分析等方法对试验结果进行数据处理和分析, 确立各个因素与焊缝成形的内在影响权重关系。试验结果表明: 焊缝熔深和熔宽主要受送丝与焊接速度影响; 焊接余高对机器人速度较为敏感。研究成果为提高焊接质量和生产效率提供了重要的理论依据和试验支持。

关键词: 正交试验; 机器人焊接; 4043铝合金; CMT-P

Experimental study on the effect of robotic CMT-P welding parameters on weld shaping of 4043 aluminum alloy

LIU Shuangyao¹, LU Yucheng², CHENG Wenfeng¹, WANG Ruiquan^{1,3}, WANG Wei², Gao Jiansen³

1. Zhejiang Polytechnic University of Mechanical & Electrical Engineering, Hangzhou 310053, Zhejiang, China

2. Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China

3. Hangzhou Geely Automobile Co., Ltd., Hangzhou 311228, Zhejiang, China

Abstract: Based on the robot CMT-P welding process, using L9 (3⁴) orthogonal experimental method, designed the robot CMT-P welding process parameters experiments for 4043 aluminum alloy, and the use of polar analysis and ANOVA and other methods of experimental data processing and analysis of the results, to establish the intrinsic influence of the factors and weld shaping of the weight of the relationship. The results show that, the weld melt depth and melt width are mainly affected by the wire feeding and welding speed; the weld margin height is more sensitive to the robot speed. The research results provide an important theoretical basis and experimental support for improving welding quality and productivity.

Keywords: orthogonal experimental; robot welding; 4043 aluminum alloy; CMT-P

1 序言

随着制造业的快速发展, 铝合金在许多领域得

到了广泛应用。4043 铝合金因其具有较高的强度和力学性能, 且耐蚀性较好, 所以是4系焊丝中最常用

基金项目: 浙江省2024年高校国内访问工程师研究项目 (FG2024037); 浙江省教育厅一般科研项目 (Y202249825)。

的类型^[1]。焊接作为一种重要的连接方法，其焊接质量对于铝合金结构的安全性和可靠性具有决定性影响。在机器人技术不断进步的背景下，机器人铝合金焊接的应用也越来越广泛。

朱轩等^[2]研究了不同电弧脉冲个数下冷金属过渡-脉冲（CMT-P）焊接工艺对 6005A-T6 铝合金焊接接头宏观形貌、微观组织和力学性能的影响。贾剑平等^[3]通过建立三维CMT焊接数值模型，对 5052 铝合金薄板CMT焊接温度场进行分析。模拟结果表明：在焊接参数相同的情况下，CMT焊接薄板的整体温度显著低于传统MIG焊薄板温度，且送丝速度越大，CMT技术的冷却作用越显著。SELVAMANI^[4]通过在恒定应力强度下使用不同热输入对CMT焊接的铝合金接头进行了应力腐蚀开裂的试验研究，以了解不同区域对应力腐蚀开裂的敏感性。黄勇等^[5]研究了不同焊接参数对3003 铝合金 PPCA-TIG 焊缝成形的影响，并分析不同的焊接参数对焊缝深宽比的影响规律。彭公武等^[6]对船用铝合金T型材的角焊缝采用熔化极氩弧焊工艺，对焊接参数进行了优化试验研究。马佳良等^[7]结合理论与试验研究了焊接参数对 6005A-T6铝合金枕梁搅拌摩擦焊接接头残余应力与焊接变形的影响，开展了正交试验、极差分析、回归分析，得出残余应力与焊接变形和焊接参数的关系式。ZHANG等^[8]系统地使用响应面方法和改进的非支配排序遗传算法（NSGA）研究了焊接参数对AA2024 CMT-P增材制造的孔隙率和表面粗糙度的影响。另外，使用优化的工艺参数，可以生产孔隙率低且表面粗糙度值低的增材零件。LI等^[9]构建了一个三因素三水平的试验，优化2mm厚6061铝合金激光焊接过程参数。周春东等^[10]采用 CMT Cycle Step 焊接工艺进行平板堆

焊正交试验，研究了送丝速度、焊接速度、熔滴数量和间隔时间4个参数对焊缝表面特征纹路及成形尺寸的影响。王健强等^[11]采用正交试验法，在不同焊接参数下对厚度为1.5mm的S600铝合金进行激光深熔焊试验。结果表明，激光功率、焊接速度、激光光束线性摆动频率对焊缝成形与焊接质量均有较大影响。

以上是近年来针对各类铝合金焊接等工艺的正交试验及优化、CMT-P焊接工艺等的研究，然而针对4043铝合金焊接用CMT-P的基于正交试验的焊接工艺研究较少。因此，本文针对4043铝合金，采用正交试验法对机器人CMT-P焊接参数进行试验设计，并利用极差分析和方差分析等方法对试验结果进行处理和分析。本研究旨在探讨机器人铝合金CMT-P焊接参数对焊缝成形的影响，为提高焊接质量和生产效率提供理论依据和试验支持。

2 试验材料与方法

2.1 材料

焊接材料选用ER4043铝合金焊丝，直径为1.2mm。基板选用AA6061铝合金板，尺寸为120mm×120mm×6mm，化学成分见表1。试验前先用砂轮将基板打磨，去除表面氧化层。

表1 ER4043焊丝和AA6061基板的化学成分
(质量分数) (%)

元素	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
ER4043	≤0.05	5	≤0.8	≤0.3	≤0.05	≤0.1	≤0.2	余量
AA6061	1.009	0.617	0.471	0.231	0.098	≤0.5	≤0.5	余量

2.2 设备

机器人焊接工作站如图1所示。此工作站为焊

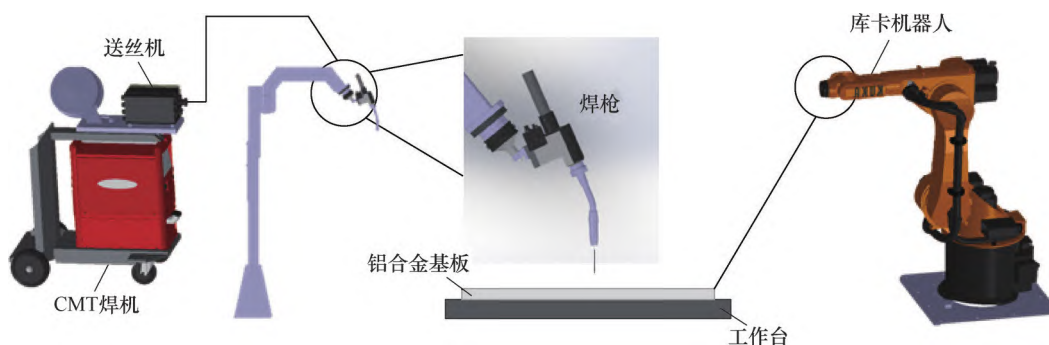


图1 机器人焊接工作站

枪保持不动，机器人末端夹持焊接工作台运动。硬件设备共分为三大模块：工业机器人单元，负责执行焊接轨迹；CMT焊接电源单元，确保能量输出恒定；辅助单元，支持整个焊接系统的协调运行^[12]。

本研究采用KUKA工业机器人，型号为KR60-3，其参数见表2。

表2 KUKA工业机器人参数

型号	有效负载/kg	最大运动半径/mm	重复精度/mm	机器人本体质量/kg
KR60-3	60	2033	±0.04	665

CMT 焊接电源模块主体是CMT TPS4000 焊机。该焊机采用CMT焊接技术，焊接电源热输入量小，无飞溅，有利于焊接和电弧增材等过程中获得良好的成形质量和成形精度。该焊机为一元化参数设置，通过送丝速度统一焊接电流与电弧电压进行焊接参数的调节。

2.3 CMT-P工艺

本研究使用CMT-P工艺，其是将CMT工艺与脉冲焊接工艺相结合。CMT工艺利用稳定的电弧和极低的热输入量，实现无飞溅焊接过程，主要用于焊接薄板或超薄板。而脉冲工艺则通过周期性变化的电流来精确控制熔滴过渡和熔深。CMT-P工艺将两种工艺的优势结合在一起，不仅适用于薄板焊接，也适用于中厚板焊接。通过精确控制熔滴过渡和熔深，CMT-P工艺可以减少焊接变形和裂纹的产生，提高焊接接头的强度和韧性。

3 正交试验设计

正交试验是从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验^[13]。影响机器人CMT-P焊接的因素有很多，如送丝速度、焊接速度、焊丝干伸长、焊枪姿态、脉冲频率及预热温度等，本研究主要关注3个工艺参数，即将送丝速度、机器人焊接速度、脉冲频率作为研究的核心因素。

CMT-P焊接参数采用正交试验，以A（送丝速度，单位为m/min）、B（机器人焊接速度，单位为mm/s）、C（脉冲频率，单位为Hz）作为影响因素，影响结果为焊缝尺寸。

本试验选取L表正交试验，根据理论参考，确定3个主要因素的变化范围：A为4~9m/min；B为5~15mm/s；C为1.5~3Hz；正交试验因素水平表见

表3。

表3 正交试验因素水平表

水平	因素		
	A	B	C
1	4	5	1.5
2	6	10	2
3	9	15	3

选用L9正交表（见表4），由因素水平表及正交表得出9个配置方案。其中，A1代表送丝速度为4m/min，A2代表送丝速度为6m/min，A3代表送丝速度为9m/min；B1代表机器人焊接速度为5mm/s，B2代表机器人焊接速度为10mm/s，B3代表机器人焊接速度为15mm/s；C1代表脉冲频率为1.5Hz，C2代表脉冲频率为2Hz，C3代表脉冲频率为3Hz。

表4 L9正交试验方案

试验方案	因素		
	A	B	C
1	A1	B1	C1
2	A1	B2	C2
3	A1	B3	C3
4	A2	B1	C2
5	A2	B2	C3
6	A2	B3	C1
7	A3	B1	C3
8	A3	B2	C1
9	A3	B3	C2

4 试验结果与分析

焊接完成后焊缝宏观形貌及剖面如图2所示，每个图像的右侧是焊缝剖面^[14]。焊缝表面光滑、均匀。两侧热影响区过渡自然，未见明显热损伤或变形。

4.1 焊缝尺寸

如图3a所示^[15]，焊缝的几何特征是通过多个关键尺寸参数进行综合评定的，主要涉及焊缝熔宽（*W*）、余高（*H*）及熔深（*D*）。焊缝熔宽定义为焊接接头最宽处的横向尺度，它对焊缝的覆盖率和结构连接强度产生重要影响。而焊缝余高描述了焊接金属相对于基材表面的凸起高度，影响着焊接成形的立体特征及其强度属性。熔深则量化了焊接热能在基材中的渗透范围，是评价焊接质量的决定性

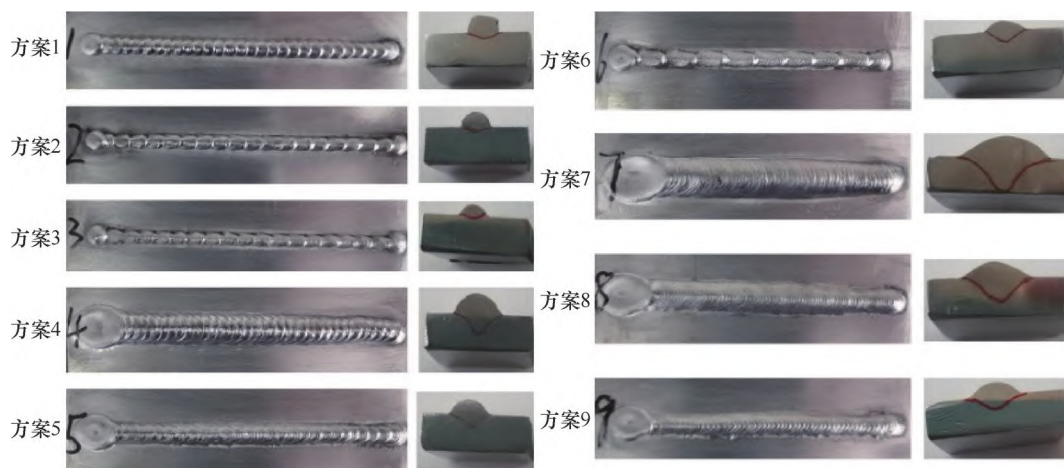


图2 焊缝宏观形貌及剖面

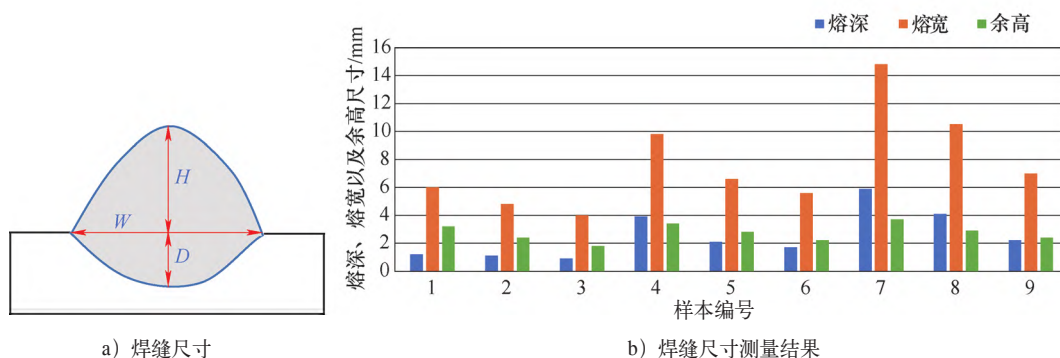


图3 焊缝尺寸测量及试验结果

指标，它直接与接头的整体牢固性及承载性能相关联。图3b所示为1#~9#共9个样本的焊缝尺寸数据，包括焊缝余高、熔宽和熔深3个指标。

4.2 正交试验的结果分析

在正交试验中，通过对试验数据进行极差分析，可评估不同因素对焊接质量的影响程度。极差分析是一种直观的数据处理方法，它通过计算各因素水平变化所引起的质量指标波动幅度来确定每个因子的重要性。一个较大的极差值表明相应因素的水平改变对焊接质量有显著影响^[16]，因此可认为该因子更重要。通过这种分析，能识别出对机器人焊件质量影响最为显著的变量，并据此选择最佳的试验水平组合，优化焊接参数。

一般地，用 X_{ij} ($i = A、B、C\dots, j = 1、2、3\dots$) 表示因素 i 第 j 水平的变量， Y_{ij} 表示在不同变量 X_{ij} 下得到的试验结果指标^[17]，则

$$K_{ij} = \sum_{m=1}^d Y_{ijm} \quad (1)$$

式中 K_{ij} ——表示因素 i 在第 j 水平结果的统计参数；

Y_{ijm} ——表示在第 m 组试验中得到的结果，
 $m=1、2、3\dots$ 。

一个因子的极差表示该因子各水平平均值的最大值与最小值的差，即

$$R_i = \max\{\overline{K_{i1}}, \overline{K_{i2}}, \overline{K_{i3}}\} - \min\{\overline{K_{i1}}, \overline{K_{i2}}, \overline{K_{i3}}\} \quad (2)$$

式中 R_i ——表示 i 因素的极差， $i=A、B、C$ ；

$\overline{K_{ij}}$ ——表示因素 i 第 j 水平的均值。

根据式(1)、式(2)计算得到的极差结果见表5。

(1) 熔深 根据表5数据可知，基于极差的大小对比，得出不同因素对熔深的影响程度具有明确的层级关系。这些因素中，送丝速度的影响最为显著，其次是机器人焊接速度，脉冲频率的影响则相对较小。综合分析后，选定A3B1C3作为各自因素的最优水平组合，这一组合方案预计将实现熔深效果的最优化。

为了直观地展示各个因素水平对熔深影响的程度，以这些因素水平的变化为横轴，性能指标值为

表5 焊缝尺寸极差分析

参数	熔深/mm			熔宽/mm			余高/mm		
	送丝速度 / (m/min)	运行速度 / (mm/s)	脉冲频率 /Hz	送丝速度 / (m/min)	运行速度 / (mm/s)	脉冲频率 /Hz	送丝速度 / (m/min)	运行速度 / (mm/s)	脉冲频率 /Hz
K_{i1}	3.201	11.001	6.999	14.799	30.6	22.101	7.401	10.299	8.301
K_{i2}	7.701	7.299	7.2	21.999	21.9	21.6	8.400	8.100	8.199
K_{i3}	12.201	4.8	8.901	32.301	16.599	25.401	9.000	6.399	8.301
$\overline{K}_{i1}$	1.067	3.667	2.333	4.933	10.200	7.367	2.467	3.433	2.767
$\overline{K}_{i2}$	2.567	2.433	2.400	7.333	7.300	7.200	2.800	2.700	2.733
K_{i3}	4.067	1.600	2.967	10.767	5.533	8.467	3.000	2.133	2.767
R_i	3	2.067	0.633	5.833	4.667	1.267	0.533	1.300	0.033

纵轴，绘制各因素水平与性能指标之间的关系图，如图4所示。

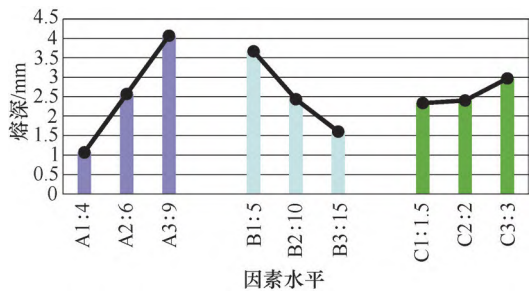


图4 因素水平与熔深指标的关系

为进一步确定哪些工艺参数对结果具有统计学上的显著影响，对焊缝熔深的数据进行方差分析，结果见表6。

表6 熔深方差分析

来源	自由度	AdjSS	AdjMS	F值	P值
送丝速度 / (m/min)	2	13.50	6.75	5.56	0.152
机器人焊接速度 / (mm/s)	2	6.49	3.24	2.67	0.272
脉冲频率/Hz	2	0.73	0.36	0.30	0.770
误差	2	2.43	1.21		
合计	8	23.14			

显著性分析表明，在所有控制因素中，送丝速度对熔深的影响最为重要，占总影响力的58.3%；其次是机器人焊接速度，对焊缝熔深造成28.04%的影响；而与之相比，脉冲频率对熔深的贡献相对较小，仅为3.15%。

(2) 熔宽 通过表5中各因素的极差可知，影响熔宽的因素按重要性排序依次是送丝速度、机器人焊接速度及脉冲频率。综合考虑，选取A3B1C3作为各因素的水平配置，构成了达到熔宽最优化的

方案。

为了形象地呈现各个因素水平对熔宽的作用程度，本研究以这些因素水平的变化作为横轴，性能指标作为纵轴，并据此描绘出因素水平与性能指标之间的关系，如图5所示。

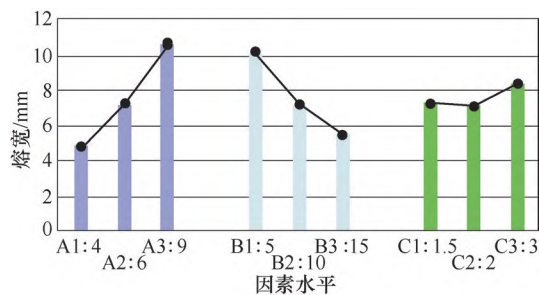


图5 因素水平与熔宽指标的关系

为了深入判断哪些焊接参数在统计学上具有显著性，进行了焊缝熔宽数据的方差分析，结果见表7。

表7 熔宽方差分析

来源	自由度	AdjSS	AdjMS	F值	P值	贡献率 (%)
送丝速度 / (m/min)	2	51.767	25.788	8.55	0.105	55.20
机器人速度 / (mm/s)	2	33.309	16.654	5.52	0.153	35.5
脉冲频率/Hz	2	2.842	1.421	0.47	0.680	3.03
误差	2	6.029	3.014			
合计	8	93.756				

显著性分析揭示，在决定熔宽的各项控制因素中，送丝速度的作用最为关键，其对熔宽的贡献达到了55.20%。机器人焊接速度在影响焊缝熔宽方面也占有相当的比例，为35.5%。相较而言，脉冲频率对焊缝熔宽的影响则相对较小，仅占3.03%。

(3) 余高 综合表格数据分析极差值来看，

在影响余高的各因素中，机器人运行速度居首位，其后是送丝速度，而脉冲频率的影响排列第三。因此，结合这些分析结果，确定A3B1C1为因素水平的最佳组合，作为实现理想余高的优选方案。

为了直观展现各个因素水平对余高影响的明显程度，选取各因素水平的变化作为图表的横坐标，性能指标值作为纵坐标，依此绘制出因素水平与性能指标间的关系图，如图6所示。

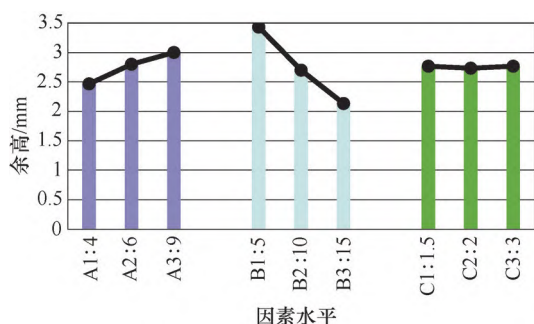


图6 因素水平与余高指标的关系

为进一步确定哪些工艺参数对结果具有统计学上的显著影响，本研究对焊缝余高数据进行了方差分析，结果见表8。

表8 余高方差分析

来源	自由度	AdjSS	AdjMS	F值	P值	贡献率 (%)
送丝速度 / (m/min)	2	0.436	0.218	28.00	0.034	14.5
机器人焊接速度 / (mm/s)	2	2.549	1.274	163.86	0.006	84.9
脉冲频率/Hz	2	0.002	0.001	0.14	0.875	0.06
误差	2	0.016	0.008			
合计	8	3.002				

显然，在影响余高的控制因素中，机器人运行速度占据了主导地位，对余高的贡献高达84.9%；送丝速度对焊缝余高的影响力为14.5%；而脉冲频率对余高的影响甚微，仅占0.06%。

4.3 机理分析

对于熔深和熔宽而言，最有影响的因素是送丝速度，其次是机器人焊接速度和脉冲频率。从以下几方面进行机理分析。

(1) 送丝速度的影响 送丝速度决定了单位时间内送入熔池的焊丝量，较快的送丝速度意味着有更多的焊丝被送入熔池，增加了熔池的体积，同时提高了热输入量。更多的焊丝熔化需要吸收更多

的热量，从而促进了熔池的扩展，增加了熔深和熔宽。并且在适当的送丝速度下，电弧保持稳定，焊丝连续且均匀地熔化，形成稳定、均匀的熔池，进而有利于获得较大的熔深和熔宽。

(2) 机器人焊接速度的影响 较慢的机器人焊接速度意味着焊枪在特定区域停留时间更长，从而增加了该区域的热输入和熔深。机器人焊接速度减慢时，热量在较长时间内通过焊接区域，会促进熔池周围材料的熔化和流动，从而增加了熔宽。

(3) 脉冲频率的影响 脉冲频率对电弧的稳定性和能量分布有一定影响，但这种影响并不是决定性的，这是脉冲频率对熔深和熔宽影响较小的可能原因。

对于余高而言，最有影响的因素是机器人焊接速度，其次是送丝速度和脉冲频率。从以下几个方面进行机理分析。

(1) 机器人焊接速度的影响 较慢的机器人焊接速度意味着焊枪在焊缝上的停留时间更长，热输入升高，更多的焊丝材料熔化在焊缝中，从而增加了焊缝的堆积高度，即余高。同时，较慢的焊接速度也增加了热量在焊缝区域的积累时间，使更多的热量能够传导到焊缝及其周围区域，进一步促进了焊丝材料的熔化和堆积。

(2) 送丝速度的影响 送丝速度决定了单位时间内送入熔池的焊丝量，较快的送丝速度虽然能增加熔敷量，焊缝形成较高的余高。然而，机器人焊接速度对余高的影响更为显著。

(3) 脉冲频率的影响 脉冲频率对余高的影响相对较小，可能是因为在在本研究所选参数范围内，脉冲频率的变化并未显著改变熔滴的过渡方式或热量的分布模式。

综上所述，送丝速度通过增加熔敷量和热输入成为影响熔深和熔宽的最主要因素。机器人焊接速度和脉冲频率则通过调节焊接时间和热量分布对熔深和熔宽产生重要影响。对于余高而言，机器人焊接速度是最有影响的因素，这是因为机器人焊接速度直接决定了焊接时间和热量积累的程度，从而影响了焊缝的堆积高度。送丝速度和脉冲频率虽然也对余高有一定影响，但在给定参数范围内，其影响相对较小。因此，在优化焊接参数以获得理想余高时，应首先关注对机器人焊接速度的调整。

5 结束语

在本研究中,利用正交试验法对机器人CMT-P焊接参数进行了试验研究。通过试验设计和数据分析,得出以下结论。

1) 通过使用参数组合(送丝速度9m/min、机器人焊接速度5mm/s和脉冲频率3Hz)获得了最大熔深和熔宽。对于熔深和熔宽而言,最有影响的因素是送丝速度,其次是机器人焊接速度和脉冲频率。送丝速度决定了单位时间内送入熔池的焊丝量,较快的送丝速度意味着更多的焊丝送入熔池,增加了熔池的体积,同时提高了热输入量。更多的焊丝熔化需要吸收更多的热量,从而促进了熔池的扩展,增加了熔深和熔宽。

2) 通过使用参数组合(送丝速度9m/min、机器人焊接速度5mm/s和脉冲频率1.5Hz),获得了最大余高。对于余高而言,最有影响的因素是机器人焊接速度,其次是送丝速度和脉冲频率。机器人焊接速度直接决定了焊接时间和热量积累的程度,从而影响了焊缝的堆积高度。

在后续研究中,综合优化CMT-P焊接参数时,需进一步综合考虑这些参数之间的相互作用,可针对多个焊缝成形的目标进行建模分析,利用神经网络或深度学习的方法进行综合优化研究,以找到最佳的参数组合,从而获得最佳的焊接效果。

参考文献:

- [1] 卢恒洲. 4043铝合金CMT电弧增材制造技术及性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
- [2] 朱轩, 杨晓益, 陆鑫, 等. 电弧脉冲对 6005A-T6 铝合金 CMT-P 焊接接头组织和性能的影响[J]. 材料导报, 2024, 38 (23): 23090035.
- [3] 贾剑平, 徐鑫, 李田雨. 铝合金CMT焊接温度场的数值模拟研究[J]. 金属加工(热加工), 2023 (1): 19-25.
- [4] SELVAMANI S T. Microstructure and stress corrosion behaviour of CMT welded AA6061 T-6 aluminium alloy joints[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021 (15): 315-326.
- [5] 黄勇, 刘永刚, 薛旭普, 等. 工艺参数对铝合金PPCA-TIG焊缝成形的影响[J]. 电焊机, 2023, 53 (11): 28-34.
- [6] 彭公武, 韩喆. 船用铝合金T型材焊接工艺参数的优化[J]. 焊接技术, 2023, 52 (1): 39-42.
- [7] 马佳良, 曾泽群, 孙屹博, 等. 工艺参数对铝合金搅拌摩擦焊变形和残余应力的影响及优化[J]. 焊接技术, 2022, 51 (1): 46-52, 114.
- [8] ZHANG Z, YAN J, LU X, et al. Optimization of porosity and surface roughness of CMT-P wire arc additive manufacturing of AA2024 using response surface methodology and NSGA-II[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 6923-6941.
- [9] LI Y, XIONG M, HE Y, et al. Multi-objective optimization of laser welding process parameters: the trade-offs between energy consumption and welding quality[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 149: 107861.
- [10] 周春东, 章晓勇, 彭勇, 等. CMT Cycle Step工艺参数对焊缝表面特征纹路及成形尺寸的影响[J]. 焊接学报, 2023, 44 (5): 95-101, 134-135.
- [11] 王健强, 赵而远, 李家曙, 等. 车用铝合金薄板激光深熔焊工艺参数研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46 (6): 727-731.
- [12] 洪思航. 铝合金电弧增材制造系统及其CMT电弧增材成形研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [13] 赵万勇. 基于正交试验的潜水轴流泵优化设计[J]. 中国农村水利水电, 2022 (8): 213-217.
- [14] ZHANG H, GUO B, DU W, et al. Study on the weld formation, microstructure and mechanical properties of AZ31B Mg alloy in AC/DC mixed gas tungsten arc welding process [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 3664-3672.
- [15] HUAN P C, WANG X N, ZHANG Q Y, et al. Study on droplet transition behavior, bead geometric characteristics and formability of wire + arc additively manufactured Inconel 718 alloy by using CMT MIX + Synchropulse process[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 17: 1831-1841.
- [16] 熊志林. 正交试验法优化铜铝超声波焊接工艺研究[J]. 机械科学与技术, 2022, 41 (4): 634-638.
- [17] 刘建春, 陈博伦, 林晓辉, 等. 基于正交实验的机器人砂带磨削工艺分析及优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021 (3): 119-123.