

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.10.15

基于响应曲面法的高强钢窄间隙激光-MAG复合焊焊缝成形规律研究

邢侯程, 张平则*

南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 江苏 南京 211106

摘要: 为深入探讨高强钢窄间隙激光-MAG复合焊焊缝成形规律,以25 mm厚Q690高强钢为研究对象,采用响应曲面法(RSM)中的Box-Behnken Design(BBD)设计三因素三水平试验,系统探究激光功率(P)、焊接电流(I)、焊接速度(V)对打底、填充和盖面焊缝成形的影响规律。针对不同焊缝功能需求,分别选取熔深与熔合比(打底焊缝)、熔宽与侧壁熔合比(填充焊缝)、宽高比与熔合比(盖面焊缝)作为响应指标,构建各成形参数的二次回归预测模型,通过方差分析(ANOVA)验证模型显著性,并结合3D响应曲面与等值线图量化工艺参数与焊缝成形之间的关系。结果表明:打底焊缝中,激光功率对熔深影响最大,最优参数为3 800 W、240 A、0.7 m/min,可实现5.6~5.7 mm稳定熔深;填充焊缝中,焊接电流对熔宽影响最大,最优参数为2 200 W、260 A、0.7 m/min,可实现侧壁熔合比0.60以上,且可根据坡口间距动态调整;盖面焊缝中,焊接速度对宽高比影响最大,最优参数为2 000 W、280 A、0.48 m/min,可获得宽高比7.0以上的平整成形。采用优化的工艺参数进行焊接试验,焊缝成形美观,无气孔、未熔合等缺陷,射线探伤结果达标。与传统电弧焊相比,该工艺使坡口填充面积减少50.4%,焊接热输入降低48.4%,焊接效率提升47.8%,为Q690高强钢厚板结构的高效高质量焊接提供了可靠的工艺方案与理论支撑。

关键词: Q690高强钢;窄间隙激光-MAG复合焊接;响应曲面法;焊缝成形规律;工艺优化

中图分类号: TG457.19 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)10-0131-17

Research on the Weld Forming Law of High-Strength Steel Narrow-Gap Laser-MAG Composite Welding based on Response Surface Method

XING Yucheng, ZHANG Pingze*

School of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

Abstract: To deeply investigate the forming rules of narrow gap laser-MAG hybrid welding seams of high-strength steel, 25 mm thick Q690 high-strength steel was taken as the research object. The Box-Behnken Design (BBD) in the Response Surface Methodology (RSM) was used to design a three-factor and three-level experiment, systematically exploring the effects of laser power (P), welding current (I), and welding speed (V) on the forming of backing, filling, and cover seams. For different functional requirements of the seams, the melt depth and fusion ratio (backing seam), melt width and sidewall fusion ratio (filling seam), and width-to-height ratio and fusion ratio (cover seam) were selected as response indicators respectively. A quadratic regression prediction model for each forming parameter was constructed, the significance of the model was verified through Analysis of Variance (ANOVA), and the relationship between process parameters and seam forming was quantified using 3D response surfaces and contour plots. The results showed that in the backing seam, the laser power had the greatest impact on the melt depth, with optimal parameters being 3,800 W, 240 A, and 0.7 m/min, achieving a stable melt depth of 5.6~5.7 mm; in the filling seam, the welding current had the greatest impact on the melt width, with optimal parameters being 2,200 W, 260 A, and 0.7 m/min, achieving a sidewall fusion ratio of more than 0.60, and it could be dynamically adjusted according to the groove spacing; in the cover seam, the welding speed had the greatest impact on the width-to-height ratio,

收稿日期: 2025-08-28

作者简介: 邢侯程(1999—),男,博士研究生,主要从事激光焊接的研究。

通讯作者: 张平则, E-mail: zhangpingze@nuaa.edu.cn。

with optimal parameters being 2,000 W, 280 A, and 0.48 m/min, achieving a width-to-height ratio of more than 7.0 for smooth forming. Welding experiments were carried out using optimized process parameters, resulting in aesthetically pleasing seam formations without defects such as porosity or lack of fusion, and the radiographic inspection results met the standards. Compared with traditional arc welding, this process reduced the groove filling area by 50.4%, decreased the welding heat input by 48.4%, and increased the welding efficiency by 47.8%, providing a reliable process plan and theoretical support for the efficient and high-quality welding of Q690 high-strength steel thick plate structures.

Keywords: Q690 high-strength steel; narrow-gap laser-MAG hybrid welding; response surface method; weld formation rules; process optimization

引用格式:邢侯程, 张平则. 基于响应曲面法的高强钢窄间隙激光-MAG 复合焊缝成形规律研究[J]. 电焊机, 2025, 55(10): 131-147.

Citation: XING Yucheng, ZHANG Pingze. Research on the Weld Forming Law of High-Strength Steel Narrow-Gap Laser-MAG Composite Welding based on Response Surface Method[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(10): 131-147.

0 引言

Q690 钢是一种 800 MPa 级低合金高强钢, 因其优良的强韧性能, 在工程机械和海洋装备领域得到广泛应用^[1-4]。据统计, 国内船舶结构和海洋承重平台等大型构件中, Q690 钢材的应用占比已超 70%, 这一应用不仅提升了结构强度, 降低了构件重量, 还显著降低了制造成本^[5-9]。在船舶与海工装备中, Q690 高强钢多用于厚板结构, 这给焊接加工带来了新的挑战。传统电弧焊难以满足厚板焊接要求, 大电流易导致晶粒粗化和焊接变形, 影响结构可靠性^[10-13]; 而直接采用激光焊接则需高功率设备, 不仅成本高昂, 还容易出现气孔、咬边等焊接缺陷。因此, 开发新型焊接技术用以满足大型工程结构的加工需求, 具有重要的现实意义。

激光-电弧复合焊最早是由英国学者 W. Steen 提出, 其核心是利用激光与电弧的协同作用提升焊接质量^[14-15]。Zhang 等人^[16]针对 8 mm 厚高强度钢开展激光-MAG 复合焊, 证实该工艺可实现快速焊接、低热输入、良好的间隙桥接和强熔透效果。Russo Spena 等人^[17]针对 TWIP/DP 异种高强钢进行激光-电弧复合焊接, 发现在 50~75 kJ/cm 的热输入区间内, 能够实现异种钢的良好连接并获得高强度。

将窄间隙焊接技术与激光-电弧复合焊接技术相结合, 已成为厚板高效、高质量焊接的重要发展方向。该创新工艺通过减小坡口间隙, 大幅降低金属填充量, 有效解决了传统厚板焊接效率低、接头质量欠佳的问题, 为厚板高效焊接提供了可行路径^[18-21]。

Zhang 等人^[22]对 40 mm 厚低碳钢进行窄间隙激光-电弧复合焊, 获得无缺陷、表面过渡光滑的焊接接头, 实现了焊接效率与质量的同步提高。Huang 等人^[23]研究了不同工艺参数对窄间隙激光-MIG 复合焊接接头宏观形貌的影响, 发现电弧电压和光丝间距对复合焊间隙桥接能力的影响存在最优工艺参数。Zhang 等人^[24]提出了激光穿透打底焊和窄间隙激光填充焊的复合焊接工艺, 解决了 DSS2205 钢和 X65 钢双金属厚板的分层焊接问题。尽管窄间隙激光-电弧复合焊接技术在解决厚板焊接问题上取得了显著进展, 但仍存在未熔合、气孔等焊接缺陷, 以及多重热循环作用所引起的焊接接头微观组织和力学性能在厚度方向上的不均匀分布的问题^[25-27]。

基于此, 本文以船舶制造业中应用广泛的 Q690 高强钢作为研究对象, 在搭建复合焊接系统平台的基础上, 围绕窄间隙激光-MAG 复合焊接工艺优化展开研究, 重点分析激光功率、焊接速度、焊接电流等核心工艺参数对焊缝成形的交互影响规律。通过响应曲面法建立二次回归预测模型, 开展窄间隙激光-MAG 复合焊接工艺参数的多目标优化试验, 为该工艺的工程应用提供理论支撑。

1 试验材料、设备及方法

1.1 试验材料

试验母材为典型调质处理的 Q690 高强钢, 因其强度高、低温韧性好而广泛应用于船舶建造及海洋平台等领域。试验所用 Q690 板材尺寸为 350 mm×

150 mm×25 mm。焊丝选用遵循等强匹配原则,参考 GB/T 8110,确定 CHW-80C1 焊丝为填充材料。母材与焊丝的化学成分和力学性能分别如表 1、表 2 所示。

表 1 母材和焊丝化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of base metal and welding wire (wt. %)

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr
母材	0.16	0.33	1.2	0.014	0.004	0.247
焊丝	0.096	0.38	1.74	0.01	0.01	0.46
材料	Ni	Cu	Al	Ti	Fe	
母材	0.013	0.024	0.033	0.022	Bal.	
焊丝	2.75	0.092	—	—	Bal.	

表 2 母材和焊丝力学性能

Table 2 Mechanical properties of base metal and welding wire

材料	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 /%	冲击吸收功 /J
母材	887	849	14.5	117(-20℃)
焊丝	894	835	16.5	99(-20℃)

1.2 焊前预处理及坡口尺寸

Q690 高强钢焊接对焊前预处理要求严格。首先采用机械切割加工窄间隙坡口,坡口形式为单边开 6°坡口并预留 5 mm 钝边,这种坡口形式可有效减少焊接变形和热输入。焊接前先用重油污清洗剂彻底去除试板表面及坡口处的油污,再使用打磨机清除坡口及周边 20 mm 范围内的氧化层,确保待焊区域表面光滑、无毛刺。考虑到 Q690 钢碳当量较高、冷裂倾向性大,焊接前需对试板进行 130℃ 整体预热,通过降低焊缝冷却速度,抑制马氏体组织过量生成,从而减少冷裂纹等焊接缺陷。

1.3 试验设备及方法

本研究搭建的窄间隙激光-MAG 复合焊接系统试验设备主要包括万瓦级激光器、电弧焊机和焊接机器人。激光器选用 IPG 公司 YSL-10000-SS4 型光纤激光器,额定功率 10 kW,激光波长 1.08 μm,焦距为 470 mm;电弧焊机选用 Fronius TPS500i 型 MAG 焊机;焊接机器人选用 KUKA 六轴联动机器人。窄间隙激光-MAG 复合焊接平台如图 1 所示,利用机器人将激光头固定,并通过工装将焊枪与激光头进行组合,以保证两者同轴运行。焊接保护气为 80%Ar+20%CO₂。

窄间隙激光-MAG 复合焊接完成后,采用线切割制备金相试样。使用 120 目至 2000 目砂纸依次打



(a) 焊接试验平台



(b) YSL-10000 型光纤激光器; (c) TPS500i 焊机

图 1 焊接试验设备

Fig. 1 Welding test equipment

磨接头表面,然后用 2.5 μm 的金刚石抛光膏精抛,直至接头表面成镜面无划痕,最后用 4% 硝酸酒精用于接头腐蚀。金相试样制备完成后,选用 ZEISS 公司的 Smartzoom 3D 宏观显微镜和 Axiover-200MAT 倒置显微镜对接头宏观形貌和微观组织进行表征。

2 试验结果与讨论

2.1 基于响应曲面法的焊缝成形试验设计

响应曲面法(RSM)的核心是通过对连续变量进行赋值,构建曲面模型,从而评估自变量及其交互作用,预测最佳工艺参数范围,并确定各组自变量的最优组合。本研究采用 Design-Expert 软件实现 RSM 分析,基础线性模型如式(1):

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_nx_n + \varepsilon \quad (1)$$

式中 y 为响应值; $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为自变量; ε 为响应误差。

考虑到焊接过程中参数与成形的非线性关系,为提高最优值附近的预测精度,采用二阶回归模型进行拟合,其近似模型如式(2)所示:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^m \alpha_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^m \alpha_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

式中 α_i 、 α_{ii} 、 α_{ij} 分别表示线性效应、二阶效应和交互效应。为平衡试验效率与数据可靠性,本研究选用 RSM 中的 Box-Behnken Design (BBD) 设计三因素三水平试验。采用高(+1)、中(0)、低(-1)三个水平,所有试验点与设计中心等距,并具有一定的旋转性,确保数据的均衡性和预测方差的均匀分布,使得非线性关系的评估更为准确,如图2所示。此外,BBD设计仅用17次试验次数验证模型中一次项、二次项以及交互项,相较于全因子设计(27次)大幅减少试验工作量。三因素 BBD 试验点的空间分布如图2所示。

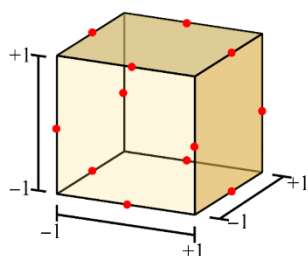


图2 三因素 Box-Behnken Design 的试验点

Fig. 2 Experiment points of three factors BBD design

结合窄间隙激光-MAG复合焊接工艺特点及前期探索试验,选取激光功率 P 、焊接电流 I 和焊接速度 V 作为试验因素,按照BBD方法分别设计打底焊缝、填充焊缝和盖面焊缝的工艺试验。其中,熔深和熔合比为打底焊缝的响应值,熔宽和侧壁熔合比为填充焊缝的响应值,宽高比和熔合比为盖面焊缝的响应值,分别建立高强钢窄间隙激光-MAG复合焊接参数预测模型,通过量纲变换后分别对应-1、0、1,即对应低、中、高三水平。经过前期工艺探索,打底焊缝、填充焊缝和盖面焊缝中各因素的取值范围分别如表3~表5所示。

表3 打底焊缝的因素编码

Table 3 Factor coding table for root pass

编码	激光功率/W	焊接电流/A	焊接速度/(m·min ⁻¹)
-1	3 600	220	0.6
0	3 800	240	0.7
1	4 000	260	0.8

2.2 打底焊缝成形规律研究

2.2.1 熔深及熔合比响应曲面模型建立与检验

对于窄间隙焊接,熔深(H_1)的控制尤为重要,直接反映了复合热源对母材深熔能力;熔合比(θ)

表4 填充焊缝的因素编码

Table 4 Factor coding table for filler pass

编码	激光功率/W	焊接电流/A	焊接速度/(m·min ⁻¹)
-1	2 000	240	0.6
0	2 200	260	0.7
1	2 400	280	0.8

表5 盖面焊缝的因素编码

Table 5 Factor coding table for cover weld

编码	激光功率/W	焊接电流/A	焊接速度/(m·min ⁻¹)
-1	1 800	260	0.54
0	2 000	280	0.48
1	2 200	300	0.42

为被熔化母材在焊缝中的占比,对焊缝与两侧母材的熔合情况进行量化,其计算公式如式(3)所示

$$\theta = \frac{S_1}{S_1 + S_2} \quad (3)$$

式中 S_1 为熔化母材面积; S_2 为填充金属面积。

打底焊缝熔深及熔合比的计算示意图如图3所示,典型打底焊缝的宏观形貌如图4所示。

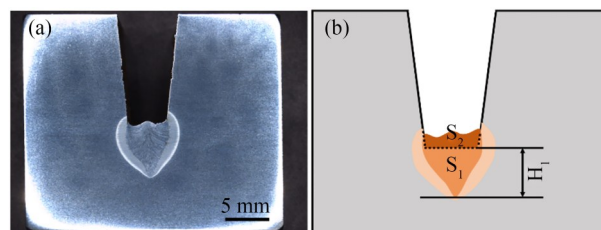


图3 打底焊缝熔深及熔合比计算示意

Fig. 3 Schematic diagram of root pass weld depth and fusion ratio

基于 Box-Behnken Design (BBD) 设计的 17 组打底焊缝试验方案及结果如表6所示,根据表6的熔深和熔合比数据建立响应曲面模型,确定打底焊缝熔深和熔合比的二次回归预测方程,如式(4)、式(5)所示。

$$H_1 = -43.8005 - 0.01264x_1 + 0.466562x_2 + 62.9x_3 - 0.0000075x_1x_2 + 0.00675x_1x_3 + 0.00375x_2x_3 + 0.000001569x_1^2 - 0.001099x_2^2 - 61.975x_3^2 \quad (4)$$

$$\theta = -13.9239 + 0.00503x_1 + 0.026941x_2 + 10.85x_3 - 0.00000134x_1x_2 + 0.00849x_1x_3 + 0.010671x_2x_3 + 0.00006596x_1^2 - 0.00004x_2^2 - 4.07011x_3^2 \quad (5)$$

式中 x_1 、 x_2 、 x_3 分别对应激光功率、焊接电流、焊接速度的编码值。对上述两个模型进行检验,其实际值与预测值的对比如图5所示,所有数据点均匀地分布在45°对角线附近,实际值与预测值基本保持

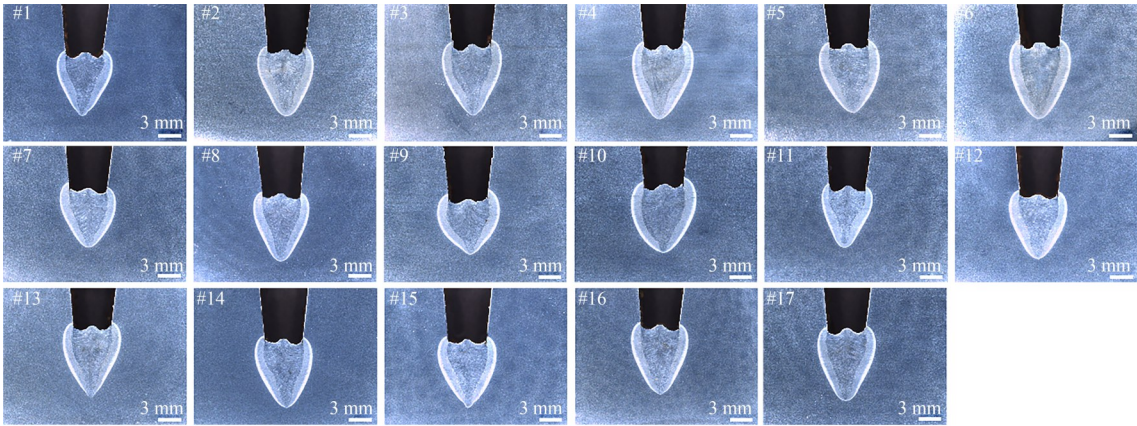


图 4 打底焊缝宏观照片

Fig. 4 Macrophotograph of root pass

表 6 打底焊缝响应曲面法设计

Table 6 Design of the response surface method for root pass

序号	激光功率 /W	焊接电流 /A	焊接速度 /(m·min ⁻¹)	熔深 H _f /mm	侧壁熔合 比η	序号	激光功率 /W	焊接电流 /A	焊接速度 /(m·min ⁻¹)	熔深 H _f /mm	侧壁熔合 比η
1	3 600	220	0.7	5.01	0.539	10	3 800	260	0.6	4.82	0.472
2	4 000	220	0.7	5.35	0.529	11	3 800	220	0.8	4.37	0.562
3	3 600	260	0.7	5.28	0.503	12	3 800	260	0.8	4.61	0.498
4	4 000	260	0.7	5.50	0.471	13	3 800	240	0.7	5.61	0.541
5	3 600	240	0.6	5.32	0.452	14	3 800	240	0.7	5.64	0.550
6	4 000	240	0.6	5.27	0.464	15	3 800	240	0.7	5.64	0.556
7	3 600	240	0.8	4.67	0.541	16	3 800	240	0.7	5.68	0.556
8	4 000	240	0.8	5.16	0.485	17	3 800	240	0.7	5.74	0.558
9	3 800	220	0.6	4.61	0.451						

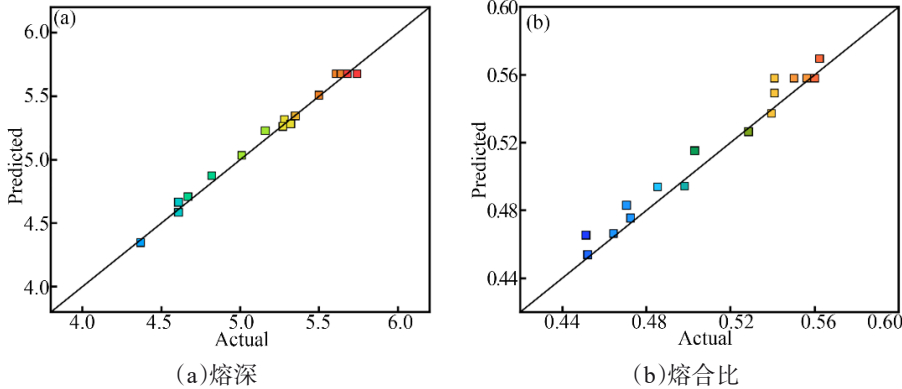


图 5 打底焊缝实际值与预测值的对比

Fig. 5 Comparison of actual and predicted values of root pass weld depth and fusion ratio

一致,证明了熔深与熔合比的回归模型预测结果较为精准。

进一步通过方差分析(ANOVA)评估模型显著性及参数影响权重,结果如表7、表8所示。对于熔深回归预测模型中,工艺参数对其影响程度的排序为:激光功率>焊接电流>焊接速度;而对熔合比回

归预测模型中,工艺参数对其影响程度的排序为:焊接速度>焊接电流>激光功率。这种基于响应曲面模型以及F值、P值分析的方法,能更直观地分析自变量及其相互作用对打底焊缝成形规律的影响。综合分析表明,激光功率和焊接电流对打底焊缝成形的影响最为显著。

表 7 打底焊缝熔深回归分析结果

Table 7 Regression analysis result of root pass weld depth						
方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性
回归	9	3.04	0.337 6	98.46	<0.000 1	显著
x_1	1	0.125 0	0.337 6	98.46	<0.000 1	
x_2	1	0.094 6	0.125 0	36.45	0.000 5	
x_3	1	0.183 0	0.094 6	27.59	0.001 2	
x_1x_2	1	0.003 6	0.183 0	53.37	0.000 2	
x_1x_3	1	0.072 9	0.003 6	1.05	0.339 7	
x_2x_3	1	0.000 2	0.072 9	21.26	0.002 5	
x_1^2	1	0.016 6	0.000 2	0.065 6	0.805 2	
x_2^2	1	0.814 2	0.016 6	4.83	0.063 8	
x_3^2	1	1.62	0.814 2	237.43	<0.000 1	
失拟	3	0.013 9	0.004 6	1.84	0.279 9	不显著
误差	4	0.010 1	0.002 5			

2.2.2 单因素与多因素交互作用对熔深及熔合比的影响

以BBD试验设计的中心点参数(激光功率3 800 W、焊接电流 240 A、焊接速度 0.7 m/min)为基准,通过固定两个参数、改变第三个参数的方式,探究单因

表 8 打底焊缝熔合比回归分析结果

Tab. 8 Regression analysis result of root pass fusion ratio						
方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性
回归	9	0.026 1	0.002 9	31.17	<0.000 1	显著
x_1	1	0.000 9	0.000 9	10.13	0.015 4	
x_2	1	0.002 4	0.002 4	25.42	0.001 5	
x_3	1	0.007 6	0.007 6	81.80	<0.000 1	
x_1x_2	1	0.000 1	0.000 1	1.24	0.301 9	
x_1x_3	1	0.001 2	0.001 2	12.41	0.009 7	
x_2x_3	1	0.001 8	0.001 8	19.62	0.003 0	
x_1^2	1	0.002 9	0.002 9	31.55	0.000 8	
x_2^2	1	0.001 1	0.001 1	11.65	0.011 2	
x_3^2	1	0.007 0	0.007 0	75.09	<0.000 1	
失拟	3	0.000 4	0.000 1	2.49	0.199 8	不显著
误差	4	0.000 2	0.000 1			

素对打底焊缝熔深与熔合比的影响趋势,结果如图 6、图 7 所示。随着激光功率的增加,熔深稳步提高,而熔合比先增加后减小,这是由于热输入和能量密度的增加促使熔深和母材熔化量增加,但过高激光功率会减小坡口两侧熔化,同时金属蒸发和飞溅等因素

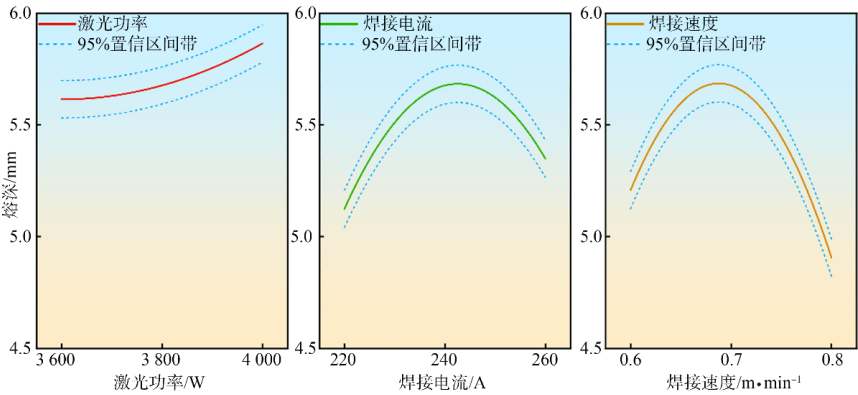


图 6 单因素对打底焊缝熔深的影响
Fig. 6 Effect of single factors on root pass weld depth

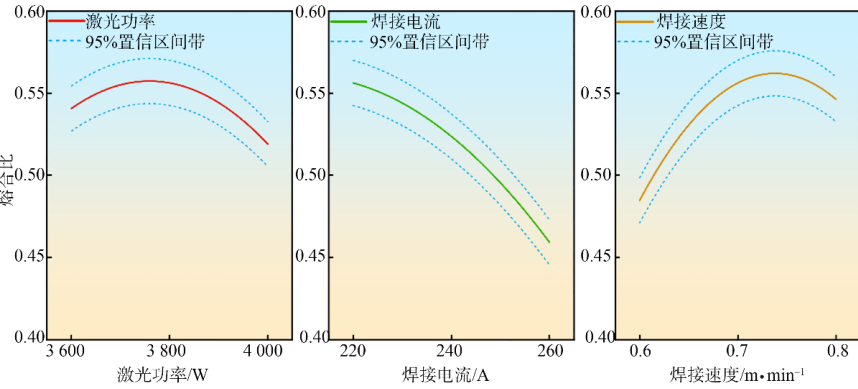


图 7 单因素对打底焊缝熔合比的影响
Fig. 7 Effect of single factors on root pass fusion ratio

导致熔合比下降。随着焊接电流的增加,熔深先增加后减小,而熔合比增加,这是因为焊接电流的热量主要作用于焊丝,对熔深的影响较小,但是会显著增加坡口两侧母材的熔化量。随着焊接速度的增加,熔深先增加后减小,而熔合比呈上升趋势。

图 8、图 9 为多参数的交互作用对打底焊缝熔深及熔合比的 3D 曲面图和等值线图,其说明某参数为中心值不变时,其余两组参数相互作用对熔深和熔合比的影响。由图 8 可知,激光功率和焊接电流的交互作用对熔深的影响与激光功率和焊接速度的交互作用相似,随焊接电流或焊接速度的增加,焊缝熔深都呈现先增加后减小的倒“U”形,等高线较为平行且间距均匀,而激光功率增加会加大变化趋势,促进熔深增加,但激光功率和焊接速度的交互作用的影响程度更大。焊接电流和焊接速度与焊缝熔深之间的 3D 图呈现出“山谷”形状,等高线呈现出闭合的同心圆,说明存在一个最优组合并存在强烈的非线性相互作用,焊缝熔深在焊接速度和

焊接电流范围两侧往中心增加。观察图 9 中熔合比的变化,激光功率和焊接电流的交互作用对熔合比的影响较小,等高线间距分布均匀,而其余两组工艺参数的交互作用对其影响十分显著。焊接速度与焊接电流、激光功率的 3D 图呈现出从一端到对角线另一端的倾斜趋势,说明激光功率和焊接电流对熔合比的影响并不显著,但是焊接速度的增加会显著提高熔合比,当焊接速度在 0.70~0.75 m/min 之间,熔合比存在最大值。

2.3 填充焊缝成形规律研究

2.3.1 熔宽及侧壁熔合比响应曲面模型建立与检验

在窄间隙焊接中,填充焊缝的熔宽(W_1)反映了焊缝与坡口两侧母材的熔合程度。而边侧壁会成为焊缝的一部分,可以采用侧壁熔合比(η)作为衡量窄间隙激光-MAG 复合焊接质量的关键参数,说明焊缝与侧壁及前一道焊缝之间的熔合情况。计算公式如式(6)所示。填充焊缝熔宽及侧壁熔合比计算示意和填充焊缝宏观照片如图 10、图 11 所示,

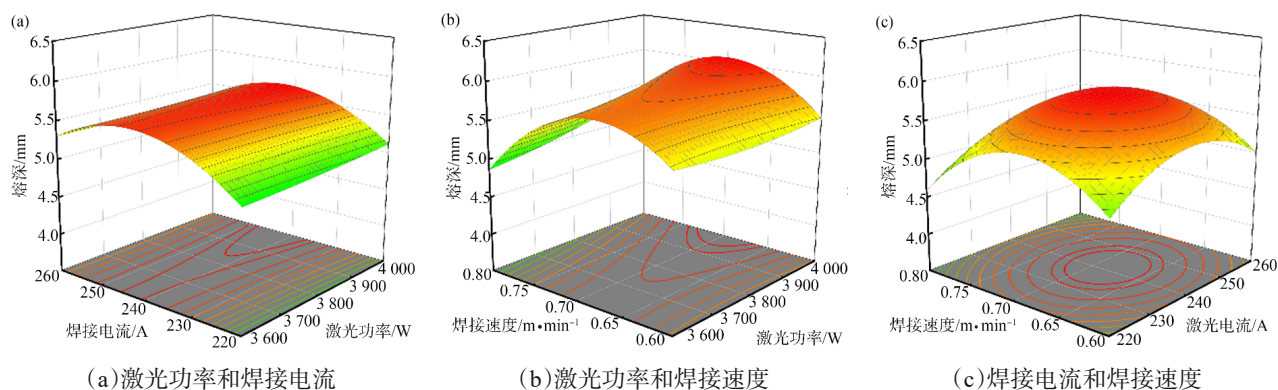


图 8 交互作用对打底焊缝熔深的影响

Fig. 8 Effect of interaction on base weld depth

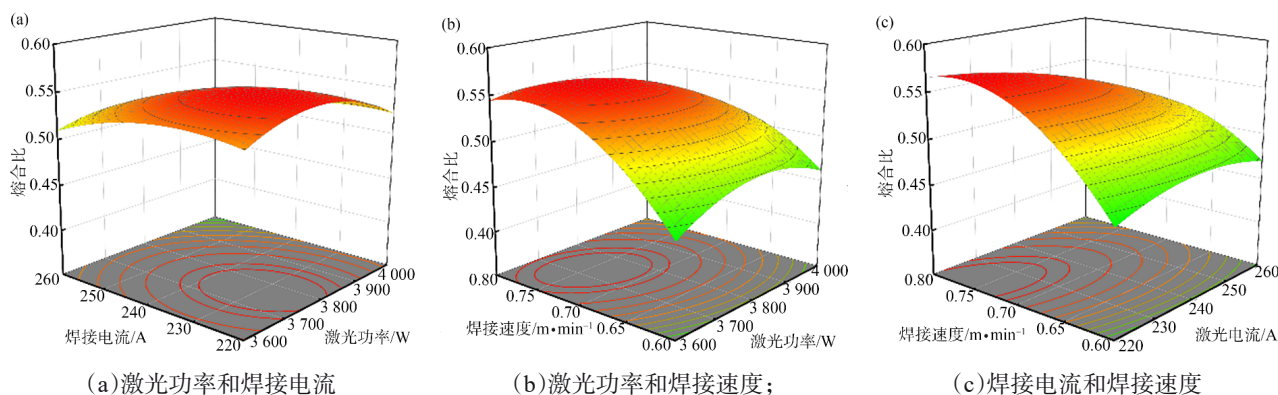


图 9 交互作用对打底焊缝熔合比的影响

Fig. 9 Effect of interaction on base weld melting ratio

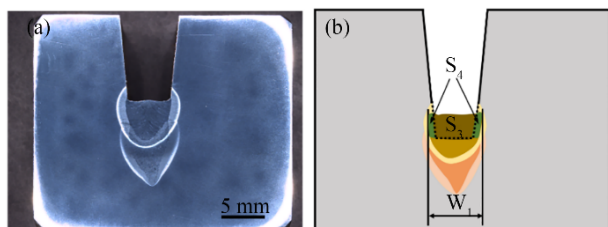


图 10 填充焊缝熔宽及侧壁熔合比计算示意

Fig. 10 Diagram of filler weld width and fusion ratio of side wall

试验方案设计如表 9 所示。

$$\eta = \frac{S_4}{S_3 + S_4} \quad (6)$$

式中 S_3 为两边侧壁母材熔化面积, S_4 为填充金属填充坡口面积。

根据表 9 中的熔宽和侧壁熔合比数据建立响应曲面模型,确定了窄间隙激光-MAG 复合焊填充焊缝的熔宽和侧壁熔合比的二次回归预测方程,如式(7)、式(8)所示。

$$W_1 = -67.7269 + 0.01631x_1 + 0.317549x_2 + 38.39x_3 +$$

$$0.00000375x_1x_2 + 0.00725x_1x_3 - 0.135x_2x_3 -$$

$$0.0000050249x_1^2 - 0.0004399x_2^2 - 13.6x_3^2 \quad (7)$$

$$\eta = -17.243 + 0.004985x_1 + 0.0730271x_2 + 8.0345x_3 -$$

$$0.0000002499x_1x_2 - 0.00055x_1x_3 - 0.0065x_2x_3 -$$

$$0.000001019x_1^2 - 0.0001295x_2^2 - 3.83x_3^2 \quad (8)$$

图 12 为上述两个模型的实际值和预测值,用于检验回归方程的准确性,实际值与预测值的比较点都落于 45° 对角线附近,数值上基本保持一致,说明了熔宽和侧壁熔合比的响应曲面模型十分可靠。

为评估熔宽和侧壁熔合比响应曲面模型的可信度及可靠性,对其进行方差分析,结果如表 10、表 11 所示。通过比较熔宽和侧壁熔合比的 F 值和 P 值用以判断各因素的显著性。对于熔宽的回归预测模型,工艺因素的影响程度为:焊接电流 > 激光功率 > 焊接速度。而对侧壁熔合比的回归预测模型,工艺因素影响程度为:焊接速度 > 焊接电流 > 激光功率。通过比较响应曲面模型的 F 值和 P 值,表明焊接

表 9 填充焊缝响应曲面法设计

Table 9 Design of the response surface method for filler pass

序号	激光功率 /W	焊接电流 /A	焊接速度 /(m·min ⁻¹)	熔宽 H ₁ /mm	侧壁熔合 比 η	序号	激光功率 /W	焊接电流 /A	焊接速度 /(m·min ⁻¹)	熔宽 H ₁ /mm	侧壁熔合 比 η
1	2 200	280	0.6	5.61	0.542	10	2 000	280	0.7	5.31	0.514
2	2 200	260	0.7	5.73	0.609	11	2 200	260	0.7	5.72	0.592
3	2 200	260	0.7	5.6	0.583	12	2 400	280	0.7	5.45	0.532
4	2 400	260	0.6	5.21	0.562	13	2 000	260	0.8	5.17	0.493
5	2 200	280	0.8	5.14	0.476	14	2 400	260	0.8	5.55	0.489
6	2 200	240	0.6	5.04	0.509	15	2 200	240	0.8	5.65	0.495
7	2 000	260	0.6	5.41	0.522	16	2 400	240	0.7	5.25	0.494
8	2 200	260	0.7	5.72	0.609	17	2 000	240	0.7	5.17	0.472
9	2 200	260	0.7	5.59	0.585						

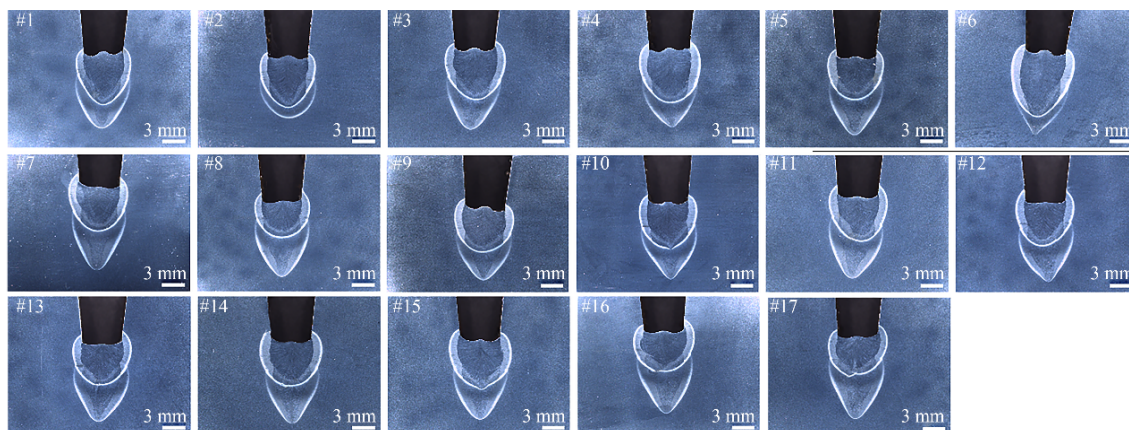


图 11 填充焊缝宏观照片

Fig. 11 Macrophotograph of filler pass

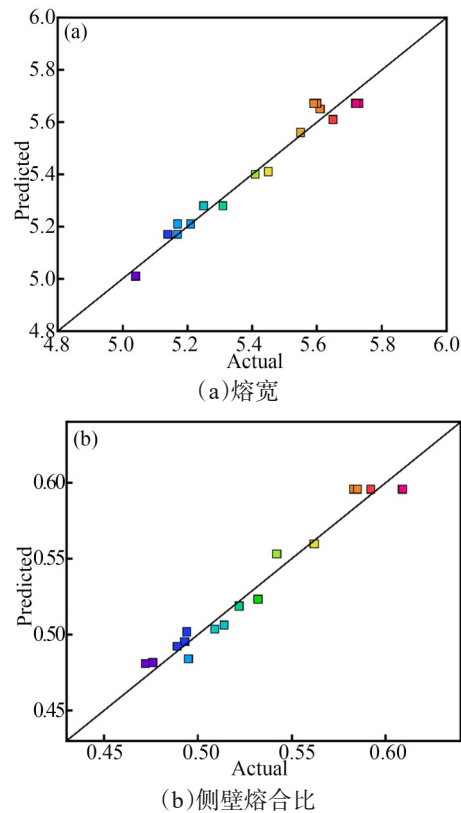


图 12 填充焊缝的实际值与预测值对比
Fig. 12 Comparison of actual and predicted values

表 10 填充焊缝熔宽回归分析结果

Table 10 Regression analysis result of filler weld width

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性
回归	9	0.845 2	0.093 9	21.85	0.000 3	显著
x_1	1	0.02	0.093 9	8.75	0.069 5	
x_2	1	0.02	0.02	4.654	0.000 25	
x_3	1	0.007 2	0.02	4.654	0.067 87	
x_1x_2	1	0.000 9	0.007 2	1.675	0.236 58	
x_1x_3	1	0.084 1	0.000 9	0.2094	0.661 07	
x_2x_3	1	0.291 6	0.084 1	19.57	0.003 07	
x_1^2	1	0.170 1	0.291 6	67.86	0.000 076	
x_2^2	1	0.130 4	0.170 1	39.59	0.000 407	
x_3^2	1	0.077 9	0.130 4	30.35	0.000 897	
失拟	3	0.030 1	0.077 88	18.12	0.003 759	不显著
误差	4	0.010 2	0.004 297 143			

速度和焊接电流对焊缝成形的影响最为显著。

2.3.2 单因素与多因素交互作用对熔宽及侧壁熔合比的影响

BBD 试验设计中,填充焊缝工艺参数的中心点为:激光功率 2 200 W,焊接电流 260 A,焊接速度为 0.7 m/min。单因素对熔宽及侧壁熔合比的影响趋

表 11 填充焊缝侧壁熔合比回归分析结果

Table 11 Regression analysis result of filler weld melting ratio of side wall

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性
回归	9	0.034 4	0.003 82	21.41	0.000 27	显著
x_1	1	0.000 7	0.000 72	4.042	0.084 28	
x_2	1	0.001 1	0.001 1	6.184	0.041 79	
x_3	1	0.004 1	0.004 14	23.18	0.001 93	
x_1x_2	1	0.000 004	0.000 004	0.022 4	0.885 25	
x_1x_3	1	0.000 484	0.000 484	2.71	0.143 72	
x_2x_3	1	0.000 676	0.000 676	3.785	0.092 77	
x_1^2	1	0.007 009	0.007 009	39.24	0.000 41	
x_2^2	1	0.011 298	0.011 298	63.26	0.000 095	
x_3^2	1	0.006 176	0.006 176	34.58	0.000 61	
失拟	3	0.001 25	0.000 178	1.258 3	0.400 6	不显著
误差	4	0.000 607	0.000 202 3			

势如图 13、图 14 所示。三组工艺参数对熔宽的影响趋势相似,随激光功率、焊接电流和焊接速度的增加,熔宽先增加后减小,但是观察曲线变化可知激光功率对熔宽的影响最大,焊接速度影响最小。这是因为激光功率和焊接电流决定了焊接区域的总热输入量,随着两者逐步增加促使熔化面积扩大,进而增加熔宽。但过高的热输入量可能引起匙孔效应,造成深穿透但较窄的焊缝。随着焊接速度增加,单位长度获得的热输入减少,导致熔宽减小。三组工艺参数对侧壁熔合比的影响趋势不同,随激光功率和焊接电流的增加,侧壁熔合比先增加后减小,焊接电流的影响程度高于激光功率。这是因为较高的能量输入促进了金属熔化和熔池流动,改善母材侧壁的润湿性和熔合程度;但热输入继续增加会导致焊缝金属过度熔化、蒸发损失和熔池不稳定,反而降低熔合比。焊接电流影响较大的原因是电弧热源更易控制和调节,直接作用于焊缝表面和两侧母材,而激光能量集中于坡口深熔。焊接速度对侧壁熔合比的影响最大,随焊接速度增加,侧壁熔合比呈持续递减趋势。这是由于速度加快使热源在每个位置的停留时间缩短,导致单位长度的能量输入减少和熔池流动性下降,不利于充分润湿和侧壁熔合。

图 15、图 16 为工艺参数的交互作用对填充焊缝熔宽及侧壁熔合比的 3D 曲面图和等值线图。由图 15 可知,对填充焊缝熔宽而言,激光功率和焊接电流的交互作用与激光功率与焊接速度的交互作用

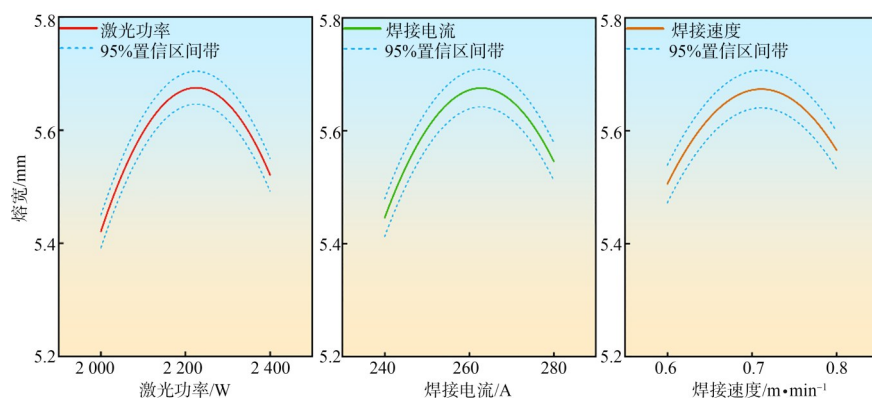


图 13 单因素对填充焊缝熔宽的影响

Fig. 13 Effect of single factors on filler weld width

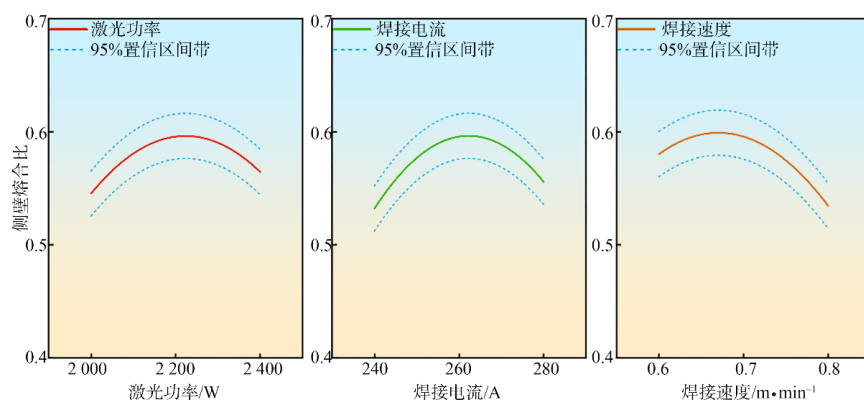


图 14 单因素对填充焊缝侧壁熔合比的影响

Fig. 14 Effect of single factors on filler weld melting ratio of side wall

影响趋势相似,3D图呈现明显的“山谷”形状,等高线呈现出闭合的同心圆,说明熔宽存在最大值并存在强烈的非线性交互作用。熔宽在激光功率和焊接电流范围两侧以及激光功率和焊接速度范围两侧共同往中心增加,且激光功率和焊接电流的交互作用的影响程度更大。而焊接电流和焊接速度的

交互作用对熔宽的影响趋势往对角线两侧逐渐减低,对角线处为熔宽最大值,当焊接速度和焊接电流都为最小值时,填充焊缝熔深最小。由图 16 可知,对于填充焊缝侧壁熔合比而言,激光功率和焊接电流的交互作用下的 3D 图呈现出“山谷”形状,在激光功率和焊接电流范围的两侧往中心增加,在

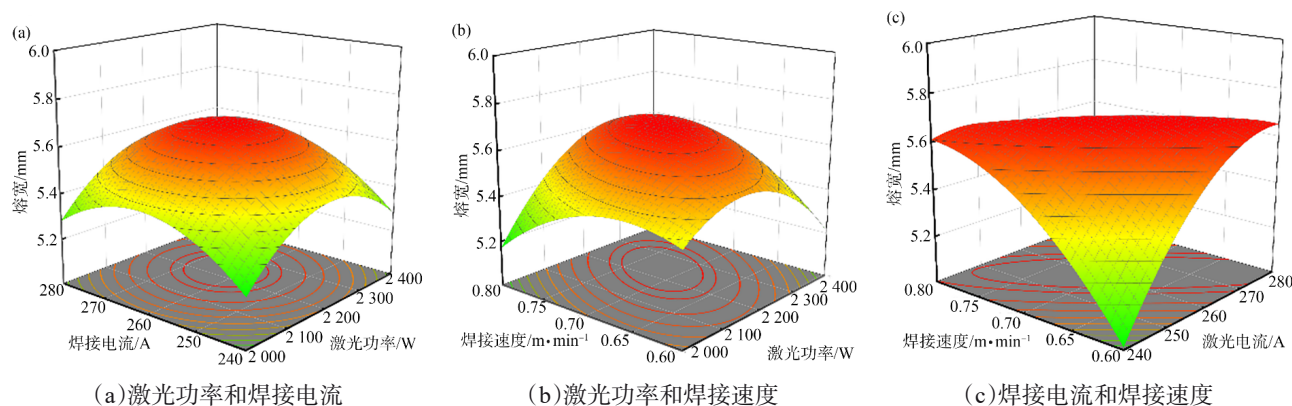


图 15 交互作用对填充焊缝熔宽的影响

Fig. 15 Effect of interaction on filler weld melting ratio

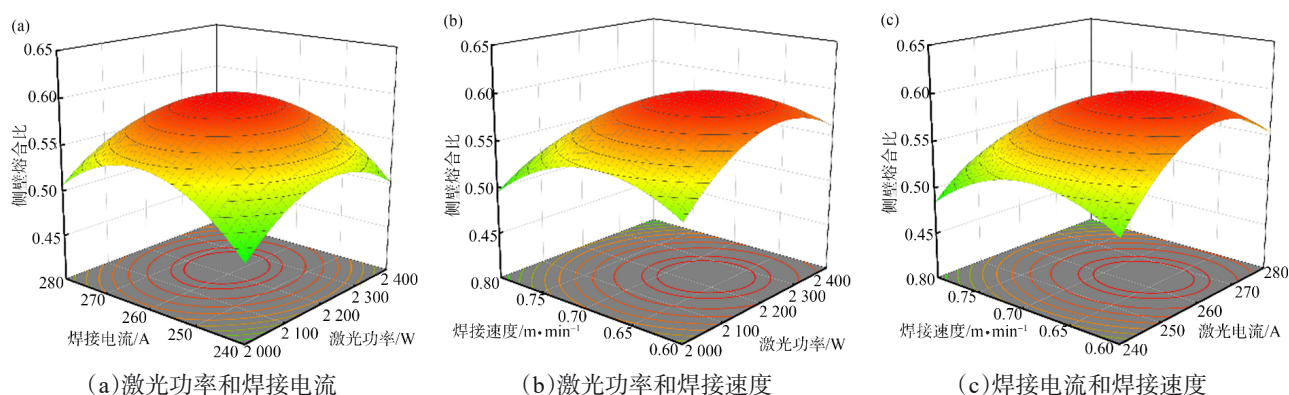


图 16 交互作用对填充焊缝侧壁熔合比的影响

Fig. 16 Effect of interaction on filler weld melting ratio of side wall

曲面中心存在最大值。而焊接速度与焊接电流、激光功率的 3D 图呈现出从一端到对角线另一端的倾斜趋势,说明焊接速度对填充焊缝侧壁熔合比的影响并不显著,而激光功率和焊接电流对侧壁熔合比的影响较为显著。当激光功率为 2 200~2 400 W,焊接电流为 260~280 A,侧壁熔合比存在最大值。

2.4 盖面焊缝成形规律研究

2.4.1 熔合比及宽高比响应曲面模型建立与检验

针对窄间隙高强钢激光-MAG 复合焊接的盖面焊缝,选择熔合比和宽高比作为响应量,用于说明盖面焊缝成形质量规律。熔合比和宽高比的公式如式(9)、式(10)所示, S_5 为前一道焊缝和母材熔化面积, S_6 与 S_7 的面积总和为填充金属面积。填充焊缝熔合比及宽高比计算示意图和填充焊缝宏观照片如图 17、图 18 所示,试验方案设计如表 12 所示。

$$\theta = \frac{S_5}{S_5 + S_6 + S_7} \quad (9)$$

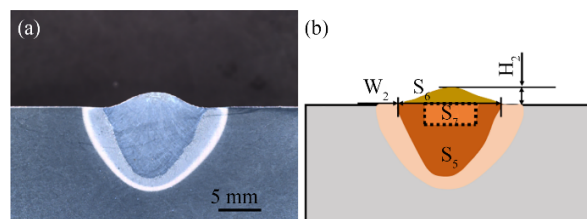


图 17 盖面焊缝熔合比及宽高比计算示意

Fig. 17 Schematic diagram of cover weld fusion ratio and aspect ratio

$$\varepsilon = \frac{W_2}{H_2} \quad (10)$$

根据表 12 的熔合比和宽高比数据建立响应曲面模型,确定二次回归预测方程,如式(11)、式(12)所示。基于实际值和预测值对上述两个模型进行检验,如图 19 所示,所有数据点均匀地分布 45° 对角线附近,实际值与预测值基本保持一致,证明熔合比和宽高比的回归模型预测结果较为精准。

$$\theta = -14.5604 + 0.00653x_1 + 0.04689x_2 + 7.352x_3 - 0.00000287x_1x_2 + 0.000479x_1x_3 - 0.00104x_2x_3 -$$

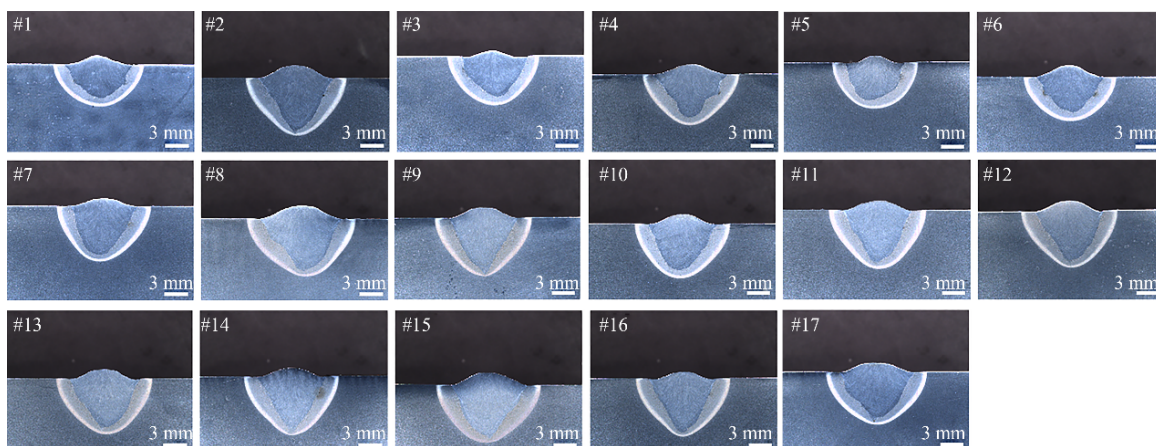


图 18 盖面焊缝宏观照片

Fig. 18 Macro photograph of cover weld

表 12 盖面焊缝响应曲面法设计

Table 12 Design of the response surface method for cover weld

序号	激光功率 /W	焊接电流 /A	焊接速度 /(m·min ⁻¹)	熔合比θ	宽高比ε	序号	激光功率 /W	焊接电流 /A	焊接速度 /(m·min ⁻¹)	熔合比θ	宽高比ε
1	1800	260	0.48	0.382	6.71	10	2000	300	0.42	0.472	6.76
2	2200	260	0.48	0.49	6.82	11	2000	260	0.54	0.452	6.36
3	1800	300	0.48	0.401	6.74	12	2000	300	0.54	0.474	6.35
4	2200	300	0.48	0.463	6.79	13	2000	280	0.48	0.507	7.21
5	1800	280	0.42	0.412	6.74	14	2000	280	0.48	0.523	7.03
6	2200	280	0.42	0.491	6.89	15	2000	280	0.48	0.532	7.19
7	1800	280	0.54	0.362	6.53	16	2000	280	0.48	0.513	7.2
8	2200	280	0.54	0.464	6.51	17	2000	280	0.48	0.526	7.15
9	2000	260	0.42	0.445	6.31						

$$0.000001434x_1^2-0.0000721x_2^2-8.5x_3^2 \quad (11)$$
$$\varepsilon=-105.83+0.11356x_1+0.48569x_2+139.74x_3-$$

$$0.000003749x_1x_2-0.003541x_1x_3-0.09583x_2x_3-$$
$$0.000002106x_1^2-0.0007669x_2^2-112.3x_3^2 \quad (12)$$

熔合比和宽高比响应曲面模型的回归分析结果如表 13、表 14 所示。通过比较熔合比和宽高比的 F 值和 P 值用以判断各因素的显著性。对于熔合比

的回归预测模型,工艺因素的影响程度依次为:激光功率>焊接速度>焊接电流。而对宽高比的回归预测模型,工艺因素影响程度排序为:焊接速度>焊接电流>激光功率。

表 13 盖面焊缝熔合比回归分析结果

Table 13 Regression analysis result of cover weld fusion ratio

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性
回归	9	0.040 3	0.004 5	17.88	0.000 5	显著
x_1	1	0.015 4	0.015 4	61.51	0.000 1	
x_2	1	0.000 2	0.000 2	0.839 3	0.390 1	
x_3	1	0.000 6	0.000 2	2.31	0.172 5	
x_1x_2	1	0.000 5	0.000 5	2.11	0.189 4	
x_1x_3	1	0.000 1	0.000 1	0.528 2	0.490 9	
x_2x_3	1	0.000 006	0.000 006	0.025	0.878 9	
x_1^2	1	0.013 8	0.013 8	55.31	0.000 1	
x_2^2	1	0.003 5	0.003 5	14	0.007 2	
x_3^2	1	0.003 9	0.003 9	15.75	0.005 4	
失拟	3	0.001 3	0.000 4	4.41	0.092 8	不显著
误差	4	0.042	0.000 1			

2.4.2 单因素与多因素交互作用对熔合比及宽高比的影响

BBD 试验设计中,盖面焊缝工艺参数的中心点为:激光功率 2 000 W,焊接电流 280 A,焊接速度为 0.48 m/min。单因素对焊缝熔合比以及宽高比的影响趋势如图 20、图 21 所示。其中,激光功率对熔合比的影响最大,随着激光功率增加,熔合比逐步增加并稳定在 0.5 左右。焊接电流和焊接速度对熔合比的影响相似,随焊接电流和焊接速度的增加,熔合比先增大后减小。激光功率作为热源之一,能够提供更强的热输入并产生更显著的匙孔效应,从而促进材料深层熔化,使熔合比持续提升直至稳定。

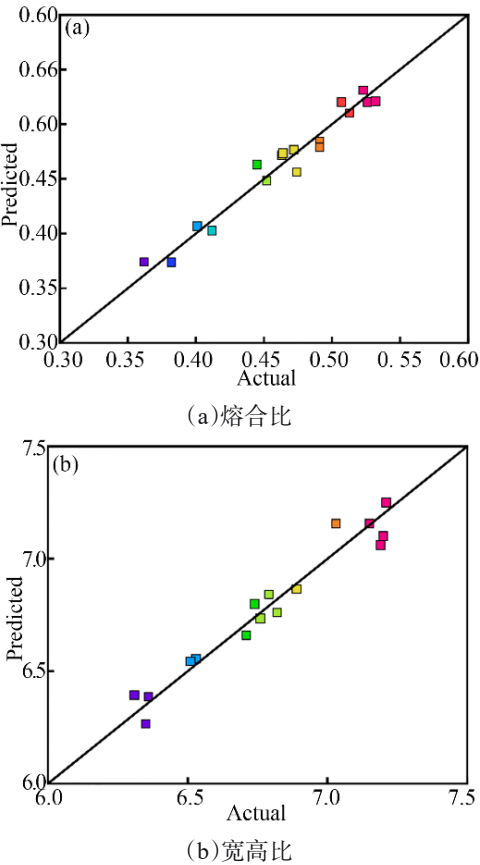


图 19 盖面焊缝的实际值与预测值对比
Fig. 19 Comparison of actual and predicted values

表 14 盖面焊缝宽高比回归分析结果

Table 14 Regression analysis result of cover weld aspect ratio						
方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性
回归	9	1.42	0.1573	20.84	0.0003	显著
x_1	1	0.0105	0.0105	1.39	0.2765	
x_2	1	0.0242	0.0242	3.21	0.1165	
x_3	1	0.1128	0.1128	14.94	0.0062	
x_1x_2	1	0.0009	0.0009	0.1192	0.74	
x_1x_3	1	0.0072	0.0072	0.957	0.3605	
x_2x_3	1	0.0529	0.0529	7.01	0.0331	
x_1^2	1	0.0299	0.0299	3.96	0.0869	
x_2^2	1	0.03962	0.03962	52.48	0.0002	
x_3^2	1	0.6881	0.6881	91.14	0.00001	
失拟	3	0.0309	0.0103	1.88	0.2738	不显著
误差	4	0.0219	0.0055			

增大电流可提升电弧热输入和改善熔池流动性,进而促进熔合,但过高的电流会导致熔池过大而降低熔合质量。适当提高焊接速度能够优化热输入分布,形成稳定的熔池。

随焊接电流和焊接速度增加,宽高比先大幅增

加后减小,而激光功率对宽高比影响较小,稳定维持在 7.0 以上。焊接电流的增加会产生较强的电弧力,进而扩展熔池宽度,导致宽高比快速上升,但当焊接电流继续增大时,过大的电弧力会导致熔池表面张力降低,使宽高比显著下降。焊接速度的影响机理与焊接电流类似,因此会出现相似的变化趋势。相比之下,激光功率主要影响熔深,对焊缝宽度的影响相对较小,因此宽高比稳定在较高水平。

图 22、图 23 为工艺参数的交互作用对盖面焊缝熔合比及宽高比的 3D 曲面图和等值线图。根据图 22 所示,激光功率和焊接电流的交互作用对熔合比的影响类似于激光功率和焊接电流的交互作用,呈现出从对角线一端到另一端的倾斜趋势。因此,焊接电流或焊接速度对熔合比的影响较小,而激光功率对熔合比的影响十分显著,这与焊接电流与焊接速度对熔合比的交互作用相互验证,整体呈现为平面趋势,变化幅度较小。当激光功率稳定在 2 000~2 200 W 时,熔合比存在最大值。由图 23 可知,激光

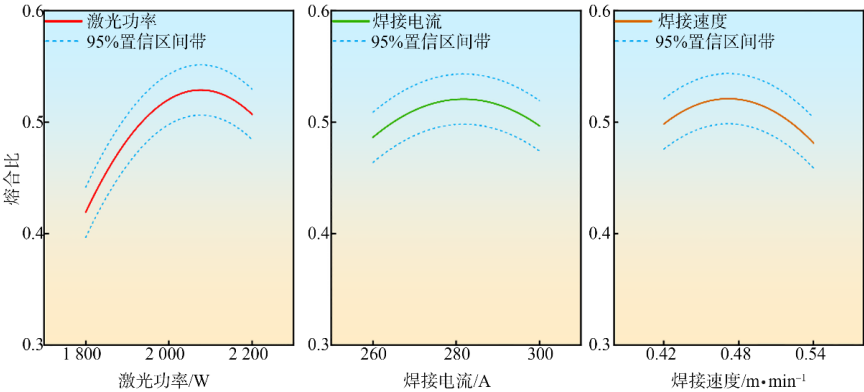


图 20 单因素对填充焊缝熔合比的影响

Fig. 20 Effect of single factors on cover weld fusion ratio

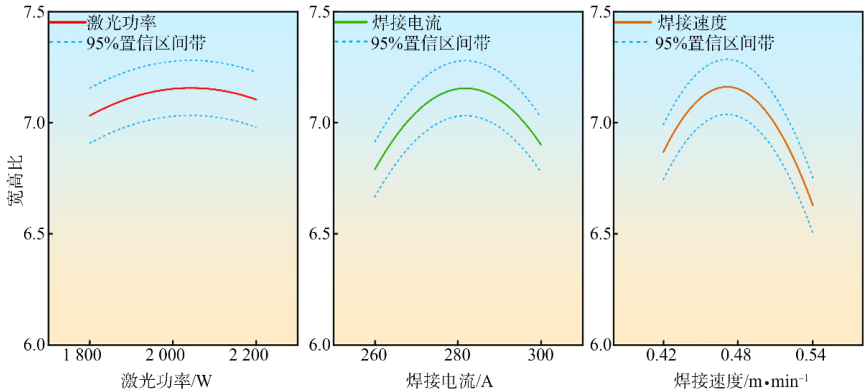


图 21 单因素对填充焊缝宽高比的影响

Fig. 21 Effect of single factors on cover weld aspect ratio

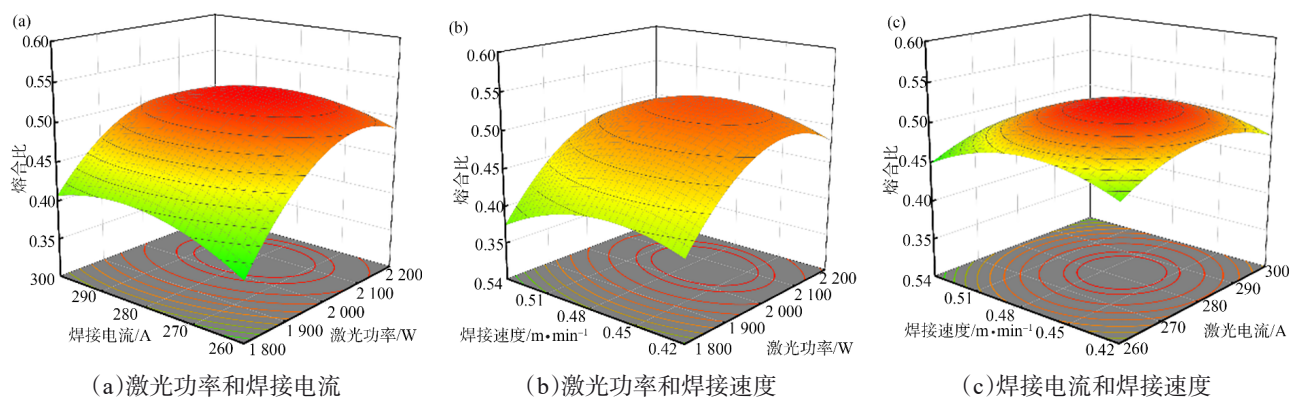


图 22 交互作用对盖面焊缝熔合比的影响

Fig. 22 Effect of interaction on cover weld melting ratio

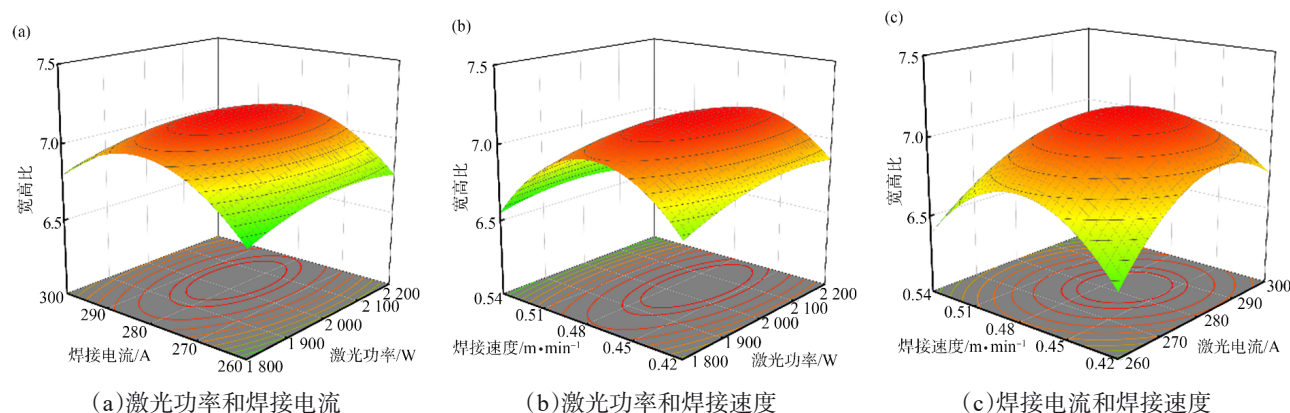


图 23 交互作用对盖面焊缝宽高比的影响

Fig. 23 Effect of interaction on cover weld aspect ratio

功率和焊接电流的交互作用对宽高比的影响与激光功率和焊接速度的交互作用相似。激光功率对宽高比的影响不显著,而随焊接电流和焊接速度增加,宽高比增加后减小。因此从焊接电流和焊接速度的交互作用可知,等高线呈现出闭合的同心圆,宽高比在焊接速度和焊接电流两侧往中心增加。

2.5 高强钢窄间隙激光-MAG 复合焊工艺参数优化

基于前三节对激光功率、焊接电流和焊接速度三组工艺参数的系统分析,采用响应面法对窄间隙激光-MAG 复合焊接工艺参数进行优化,借助 Design-Expert 软件进行了多目标优化求解,以确定

最佳工艺参数。表 15 为窄间隙高强钢激光-MAG 复合焊工艺参数,能够确保焊接过程的稳定性和焊接质量的可靠性。

在窄间隙高强钢激光-MAG 复合焊接过程中,为获得良好的焊缝成形质量并有效抑制焊接缺陷的产生,其余工艺参数设置如下:光丝间距为 2 mm,离焦量为 12 mm,保护气类型为 80%CO₂+20%Ar,气流量为 20 L/min。图 24 为高强钢窄间隙激光-MAG 复合焊缝的表面成形,从图中可以清晰观察到焊缝表面成形优良,具有平整的表面形貌,且无明显的飞溅及其他表面缺陷。

表 15 高强钢窄间隙激光-MAG 复合焊工艺参数

Table 15 Narrow Gap laser-MAG hybrid weld process parameters for high strength steels

道次	激光功率/W	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/(m·min ⁻¹)	道次	激光功率/W	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/(m·min ⁻¹)
1	3 800	240	25.2	0.7	5	2 200	280	27.2	0.7
2	2 200	260	26.5	0.7	6	2 200	280	27.2	0.6
3	2 200	260	26.5	0.7	7	2 200	280	27.5	0.6
4	2 200	280	27.2	0.7	8	2 200	280	27.4	0.48

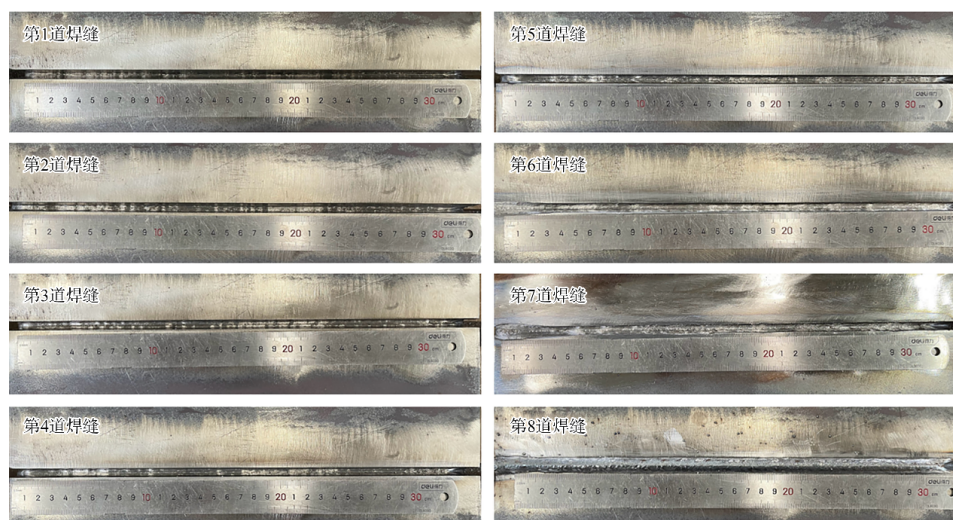
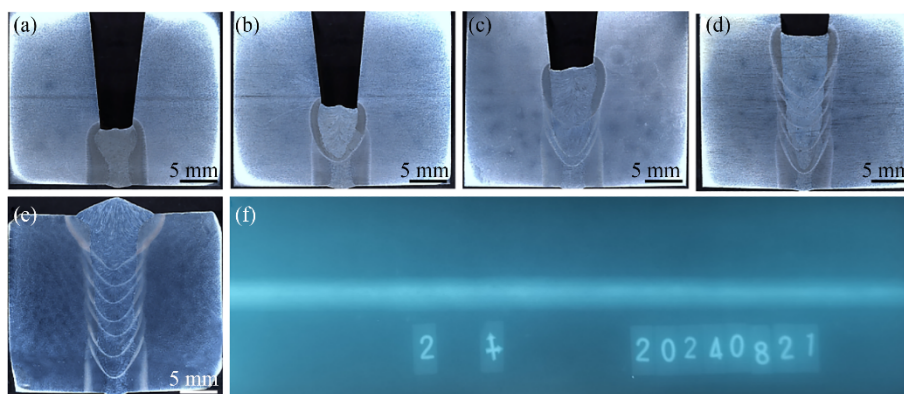


图 24 高强钢窄间隙激光-MAG 复合焊缝表面成形

Fig. 24 Surface morphology of narrow-gap laser-MAG hybrid weld for high strength steels



(a-c)宏观形貌;(f)射线探伤结果

图 25 高强钢窄间隙复合焊接头宏观形貌及焊缝射线探伤

Fig. 25 Macroscopical morphology and radiographic inspection results of narrow-gap hybrid weld for high strength steels

同时,为检验响应面法优化结果的准确性,对优化得到的工艺参数进行试验验证。通过对图 25 中的焊接接头截面形貌及射线探伤结果进行分析可知,不同道次的焊缝内部质量同样达到了较高水平,未发现气孔、未熔合等内部缺陷,表明该工艺参数组合能够有效确保焊接接头的整体质量。

3 结论

本研究采用响应曲面法中的 BBD 设计选取激光功率、焊接电流、焊接速度作为应变变量,分别对打底焊缝、填充焊缝和盖面焊缝进行建模预测分析,优化 25 mm 厚 Q690 高强钢窄间隙激光-MAG 复合焊接工艺参数,得到了如下结论:

(1)打底焊缝、填充焊缝和盖面焊缝的各组响应量的响应曲面模型中,P 值都小于 0.001,且实际值与预测值高度吻合,数据点均匀分布于 45° 对角线附近,都说明二次回归预测模型高度显著,能有效预测工艺参数与焊缝成形之间的关系,包括单因素效应和多因素交互作用。

(2)由打底焊缝的模型可知,参数对熔深的影响程度:激光功率>焊接速度>焊接电流,熔深与激光功率呈正相关,但会随焊接速度和焊接电流的增加而先增后减;参数对熔合比的影响程度:焊接速度>焊接电流>激光功率,熔合比由焊接速度所主导。由填充焊缝的模型可知,参数对熔宽的影响程度:激光功率>焊接电流>焊接速度,熔宽会随各组参数增加而先增后减;参数对侧壁熔合比的影响程

度:焊接速度>焊接电流>激光功率,侧壁熔合比也由焊接速度所主导。由盖面焊缝的模型可知,参数对熔合比的影响程度:激光功率>焊接速度>焊接电流,熔合比由激光功率所主导;参数对宽高比的影响程度:焊接速度>焊接电流>激光功率,宽高比会随焊接速度和焊接电流的增加而先增后减。

(3)基于打底焊缝、填充焊缝和盖面焊缝的二次回归预测模型,对窄间隙高强钢激光-MAG复合焊接工艺参数进行优化,所获得的最佳工艺参数为:打底焊缝工艺为激光功率3 800 W、焊接电流240 A、焊接速度0.7 m/min;盖面焊缝工艺为激光功率2 000 W、焊接电流280 A、焊接速度0.48 m/min;填充焊缝工艺为激光功率2 200 W、焊接电流260 A、焊接速度0.7 m/min,且可随坡口间距动态调节。采用优化后的工艺参数进行窄间隙激光-MAG复合焊接,焊接过程呈现良好的稳定性,焊缝成形良好,无气孔、未熔合等焊接缺陷。

参考文献:

- [1] WANG L, ZHAO Y, WANG Z, et al. Mechanical properties of high strength Q690 steel at elevated temperature at low strain rates [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2025, 234: 109718.
- [2] WANG P. Application of Intelligent Manufacturing Technology in the Field of Ship Design and Manufacturing [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2074(1): 012075.
- [3] GUAN X, GUO H, CHEN Y, et al. Experimental investigation on fatigue crack growth performance of Q690D steel butt weld [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2025, 224: 109151.
- [4] WEI H, TANG Y, CHEN C, et al. Corrosion behavior and microstructure analysis of butt welds of Q690 high strength steel in simulated marine environment [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 84: 108509.
- [5] WEI H, TANG Y, CHEN C, et al. Corrosion behavior and microstructure analysis of butt welds of Q690 high strength steel in simulated marine environment [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 84: 108509.
- [6] 王江超, 杜仕忠, 牛业兴, 等. Q690 厚板对接焊残余应力评估及其对焊接接头断裂性能的影响 [J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(4): 271-281.
WANG J C, DU S Z, NIU Y X, et al. Evaluation of residual stress and its influence on fracture performance of Q690 thick plate butt welded joint [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(4): 271-281.
- [7] 刘悦, 郑晓明, 李秋明, 等. 轨道车辆转向架用 Q690 耐候钢的焊接接头性能 [J]. *钢铁*, 2024, 59(10): 77-85+106.
LIU Y, ZHENG X M, LI Q M, et al. Welded joint properties of Q690 weathering steel for railcar bogies [J]. *Iron and Steel*, 2024, 59(10): 77-85+106.
- [8] GUAN X, GUO H, CHEN Y, et al. Experimental investigation on fatigue crack growth performance of Q690D steel butt weld [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2025, 224: 109151.
- [9] GUO H, GUAN X, PAN Y, et al. Experimental research on fatigue crack growth behavior of Q690D high strength steel [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, 220: 108809.
- [10] Gandhi D, Ghosh P, Giri S K, et al. Microstructural Evolution and Its Correlation with Gas Metal Arc Welded Dissimilar Advanced High Strength Steels [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 31(8): 6487-6499.
- [11] 杜启帆. 热输入对 Q690QENH 低合金高强钢 GMAW 焊接接头耐蚀性影响研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2022.
DU Q F. Study on the effect of heat input on Q690QENH low-alloy high strength steel GMAW welded joints corrosion resistance [D]. Tianjin: Tianjin University, 2022.
- [12] Guo H, Guan X, Pan Y, et al. Experimental research on fatigue crack growth behavior of Q690D high strength steel [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, 220: 108809.
- [13] Gandhi D, Ghosh P, Giri S K, et al. Microstructural Evolution and Its Correlation with Gas Metal Arc Welded Dissimilar Advanced High Strength Steels [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 31(8): 6487-6499.
- [14] Unni A K, Vasudevan M. Computational fluid dynamics simulation of hybrid laser-MIG welding of 316 LN stainless steel using hybrid heat source [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, 185: 108042.
- [15] Bunaziv I, Frostevarg J, Akselsen O M, et al. The penetration efficiency of thick plate laser-arc hybrid welding [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97(5): 2907-2919.
- [16] ZHANG F, LIU S, LIU F, et al. Stability evaluation of laser-MAG hybrid welding process [J]. *Optics and Laser Technology*, 2019, 116: 284-292.

- [17] Russo Spina P, Angelastro A, Casalino G. Hybrid laser arc welding of dissimilar TWIP and DP high strength steel weld [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 39: 233–240.
- [18] MENG Y, LI G, GAO M, et al. Formation and suppression mechanism of lack of fusion in narrow gap laser-arc hybrid welding [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 100 (9) : 2299–2309.
- [19] YU J, CAI C, XIE J, et al. Weld formation, arc behavior, and droplet transfer in narrow-gap laser-arc hybrid welding of titanium alloy [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 91 : 44–52.
- [20] 李若杨. 厚板窄间隙多层单道激光-电弧复合焊接过程稳定性研究 [D]. 湖北: 华中科技大学, 2017.
- LI R Y. The research on stability of narrow gap thick plate multilayers laser-arc hybrid welding [D]. Hubei: Huazhong University of Science & Technology, 2017.
- [21] LIU J, YANG T, ZHUANG Y, et al. Unveiling arc deflection instability in narrow gap laser-arc hybrid welding of thick Ti-6Al-4V plate [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 104: 87–97.
- [22] ZHANG C, LI G, GAO M, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Narrow Gap Laser-Arc Hybrid Welded 40 mm Thick Mild Steel [J]. *Materials*, 2017, 10(2): 106.
- [23] HUANG H, ZHANG P, Yan H, et al. Research on weld formation mechanism of laser-MIG arc hybrid welding with butt gap [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 133: 106530.
- [24] ZHANG Y, YANG S, WANG Z, et al. Research on hybrid technology involving laser penetration and narrow gap laser filler welding for thick bimetallic composite plates [J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 175: 110710.
- [25] ZHENG B, LI Y, AO S, et al. Narrow Gap Welding of X80 Steel Using Laser-CMT Hybrid Welding with Misaligned Laser and Arc [J]. *Crystals*, 2022, 12(6): 832.
- [26] YANG X, Chen H, Li M V, et al. Porosity suppressing and grain refining of narrow-gap rotating laser-MIG hybrid welding of 5A06 aluminum alloy [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 68: 1100–1113.
- [27] 张军. 窄间隙摆动激光填丝焊接焊缝成型、组织与性能研究 [D]. 江苏: 中国矿业大学, 2022.
- ZHANG J. Research on Weld Forming, Microstructure and Properties of Narrow Gap Wobbling Laser Wire Filling Welding [D]. Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2022.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第 113 页

- CAI F S. Welding of SA387Gr11CL2 and SA387Gr22 CL2 Pearlitic Heat-resistant Steels [J]. *Petroleum and Chemical Equipment*, 2011, 40(6): 67–70.
- [8] 张建勋, 薛承博, 牛靖, 等. 核电厚壁管道全位置 TIG 焊动态焊接变形研究 [J]. *焊接*, 2009, 2009 (11) : 14–18.
- ZHANG J X, XUE C B, NIU J, et al. Research on Dynamic Welding Deformation of Thick-walled Pipes in Nuclear Power by Full Position TIG Welding [J]. *Welding*, 2009, 2009(11): 14–18
- [9] 张佳浩, 张颖, 王鑫, 等. 一种高效预测厚壁管件焊接变形的有限元模拟方法 [J]. *压力容器*, 2017, 34(5) : 46–57.
- ZHANG J H, ZHANG Y, WANG X, et al. A Highly Efficient Finite Element Simulation Method for Predicting Welding Deformation of Thick-walled Pipe Components [J]. *Pressure Vessels*, 2017, 34(5): 46–57.
- [10] 张艾丽, 刘志斌, 关伟宏. 焊接件去应力退火工艺参数实验 [J]. *汽轮机技术*, 2000, 42(4): 251–253.
- ZHANG A L, LIU Z B, GUAN W H. Experimental Process Parameters of Stress Relief Annealing for Welded Parts [J]. *Turbine Technology*, 2000, 42(4): 251–253.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>