

基于 Q 355 材料的 G M A W 焊缝成型控制敏感性研究

罗 斌

(福建福船一帆新能源装备制造有限公司, 福建 漳州 363200)

摘 要:采用 1.2 mm 实芯焊丝 G M A W 工艺在 30 mm 厚度的 Q 355D 钢板上进行焊接实验,通过调整焊接工艺参数开展焊缝成型尺寸控制敏感性研究。试验过程中,在保证焊接位置、焊丝干伸长度和保护气体流量等其他焊接工艺参数不变的条件下,通过调整焊接电流、电压和焊接速度等参数,匹配获得了不同的焊道截面。研究结果表明,焊接电流、焊接电压和焊接速度三个因素中,焊接电压对焊缝宽度的影响最为明显,焊接电流的影响次之。对于焊缝余高而言,焊接电压同样是最为敏感的影响因素,焊接电流的影响次之。同时,根据试验结果得到了基于 G M A W 焊接工艺下焊接电流、焊接电压和焊接速度对于焊缝宽度及余高的回归方程。

关键词:G M A W ;Q 355 材料;焊接工艺参数;成型控制

中图分类号:TG 444

文献标识码:A

文章编号:1672-1152(2026)03-0036-03

0 引言

Q355 材料是一种典型的低合金高强度结构钢,根据 GB/T 1591—2018 标准,Q355 材料根据轧制工艺、性能指标等可分为 B、C、D 和 E 等若干等级,具有抗拉强度及屈服强度优良、韧性及抗冲击性能出色等优点^[1],广泛应用于钢结构、风力发电、交通运输和机械制造等行业。袁晓东等^[2]使用 $\Phi 1.2$ mm 的 ER50-6 焊丝,采用多层、多道混合气体保护焊,设计两种不同热输入的工艺参数对 30 mm 厚 Q355D 低合金钢开展焊接试验。结果表明,在 3 kJ/mm 的大热输入量焊接条件下,其焊接接头仍满足各项指标要求,展现了 Q355 材料的优良性能。张晓刚等^[3]对 Q355 低碳钢焊接接头循环载荷作用下全寿命周期的疲劳行为进行了研究,结果表明,Q355 钢焊接接头疲劳极限为 390 MPa,裂纹扩展速率随应力强度因子增加而提高。

随着工业自动化生产技术的逐渐普及,自动化焊接技术也迎来了快速发展的契机。在自动化焊接场景中,厚板多层、多道焊接是一个较为典型的工况。多层、多道自动化焊接的关键在于多层、多道焊道排布逻辑的确定。王天琪等^[4]根据焊道的层底宽度及多层多道焊缝成型模型自适应规划待焊层的工艺参数与机器人焊接路径。Fang H C 等^[5]通过研究焊缝宽度与焊接电流、电压、焊接速度、干伸长度以及焊接位置之间的关系,实现了管管相贯 TKY 复杂接头的多层、多道自动焊接排道。陈昌荣等^[6]提出了抛物线模型,结合等面积与等高法研究了多层、多道焊道排布方法,为机器人焊接相贯构件的多层、多道焊道排布提供了理论借鉴。

由于 Q355 材料应用广泛,熔化极气体保护电弧焊(G M A W)作为工程实践中广泛用于 Q355 材料焊接

的工艺形式,其自动化工艺的推广对于工程施工中的降本增效意义显著。然而,由于 G M A W 焊接工艺飞溅较大,缺乏造渣保护,导致电弧稳定性较差,在实现自动化,尤其是多层、多道自动化焊接场景有一定难度。本文通过对 G M A W 工艺下焊接电流、焊接电压和送丝速度三个因素对于焊缝成型的影响展开研究,为 Q355 材料实现 G M A W 多层、多道自动化焊接具备积极意义。

1 实验方法及材料

本试验选用 Q355D 钢板作为母材,尺寸为 600 mm $\times$ 250 mm $\times$ 30 mm,焊丝选用 $\Phi 1.2$ mm 的 ER50-6 实芯焊丝,保护气体为 80%CO₂+20%Ar₂ 混合气体,焊接设备采用麦格米特 Arlsen 500 Plus PR 型全数字逆变焊机,配合安川 AR2010 六轴机器人。母材及焊接材料的化学成分如表 1 所示。

表 1 实验材料的化学成分

材料	ER50-6	Q355D
w(C)/%	0.070	0.170 0
w(Si)/%	0.360	0.240 0
w(Mn)/%	1.450	1.400 0
w(P)/%	0.019	0.013 0
w(S)/%	0.013	0.002 1
w(Cr)/%	0.040	0.100 0
w(Ni)/%	0.010	0.030 0
w(Cu)/%	0.110	0.030 0
w(V)/%	0.002	0.002 0
w(Nb)/%	—	0.003 0
w(Ti)/%	—	0.014 0
w(Al)/%	—	0.027 0
w(Mo)/%	0.003	0.018 0

为了便于测量焊道截面的几何尺寸,采用直接在母材上进行堆焊的实验方式,焊接位置为水平位置,

收稿日期:2025-12-17

作者简介:罗 斌(1988—),男,湖北十堰人,本科,毕业于江苏科技大学,高级工程师,研究方向为金属材料焊接及其自动化。

导电嘴至焊件表面的距离保持在 25 mm。考虑到在重复多次焊接后钢板可能会发生变形从而影响测试的效果,因此,每块钢板焊接 4 条焊道。在焊接前,对钢板表面进行打磨处理,完全去除其表面的氧化皮及杂质并露出金属光泽,以保证焊接过程中的电弧稳定性。

根据 GMAW 焊接工艺的特点,本试验采用 4 组典型电流、电压匹配 4 组焊接速度,交叉组成了 16 组测试参数。焊接完成后,沿焊道垂直方向对样件进行切割。打磨腐蚀后,获得每条焊道的截面形貌,并借助光学显微镜测得每条焊道的宽度、焊缝余高等截面尺寸。焊接参数及焊道的宽度、焊缝余高数据如表 2 所示。

表 2 焊接工艺参数及对应焊道的截面尺寸

实验序号	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 (mm/min)	气体流量 (L/min)	干伸长 /mm	焊宽 /mm	余高 /mm
1	100	16	100	20	25	6.95	4.14
2			150	20	25	6.14	3.04
3			200	20	25	6.10	2.79
4			250	20	25	5.90	2.47
5	150	19	100	20	25	9.51	4.25
6			150	20	25	9.46	3.84
7			200	20	25	9.78	3.56
8			250	20	25	8.52	2.79
9	200	23	100	20	25	15.76	4.98
10			150	20	25	15.74	4.32
11			200	20	25	13.53	3.14
12			250	20	25	12.70	2.98
13	250	28	100	20	25	22.14	4.43
14			150	20	25	20.53	3.65
15			200	20	25	18.73	3.43
16			250	20	25	16.81	2.86

2 实验结果及分析

根据试验数据构建的多元线性回归模型,展现出较高的拟合度,模型决定性系数 R^2 为 0.995 2,证明模型与数据的相关性较好。调整 R^2 值和预测 R^2 值分别为 0.992 8 和 0.988 4,二者之差小于 0.2,因此,选择的模型能够准确地揭示工艺参数与焊宽的关系。

焊缝宽度方差分析结果如表 3 所示。方差分析结果显示,模型整体具有极强的解释力,能够可靠地揭示焊接参数与焊宽之间的非线性关系。焊接速度和电压的 p 值分别为 0.032 和 0.002,均小于 0.05,二者对焊宽具有显著性影响。焊宽主效应图如图 1 所示。由图 1 可知,焊宽随电压增大而显著增大,随焊接速度加快呈现弱负相关。这主要是因为电弧电压与电弧长度成正比,当电弧电压增加时,电弧长度随之增加,进而导致电弧对母材的加热范围增加,导致熔池横向扩展,从而增加了焊缝宽度。同时,当增大焊接速度时,电弧加热的效应得到削弱,电弧加热的范围变小,焊

缝宽度也随之减小。值得注意的是,电压与焊接速度的交互项其 p 值小于 0.001,说明该交互项非常显著。在曲面图中与交互的等值线图,焊宽随着电压增大和焊接速度减小而增加,如图 2、图 3 所示。

表 3 焊缝宽度方差分析

来源	自由度	调整平方和	调整均方	F 值	p 值
回归	5	431.952	86.390 5	414.31	0.000
电流	1	0.776	0.775 6	3.72	0.083
电压	1	1.290	1.290 1	6.19	0.032
焊接速度	1	3.377	3.376 9	16.19	0.002
电压×电压	1	0.853	0.852 8	4.09	0.071
电压×焊接速度	1	7.274	7.273 5	34.88	0.000
误差	10	2.085	0.208 5		
合计	15	434.038			

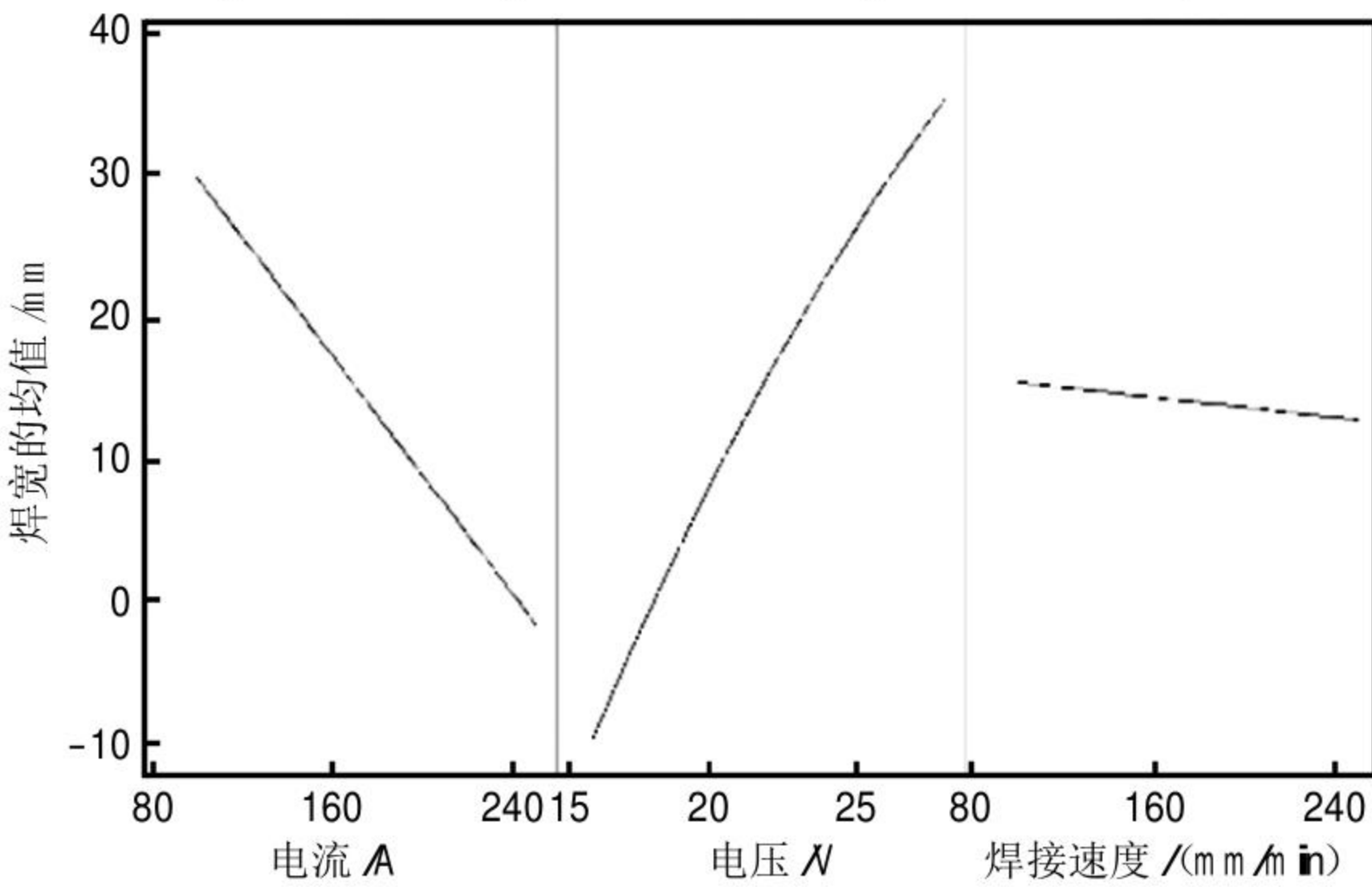


图 1 焊宽主效应

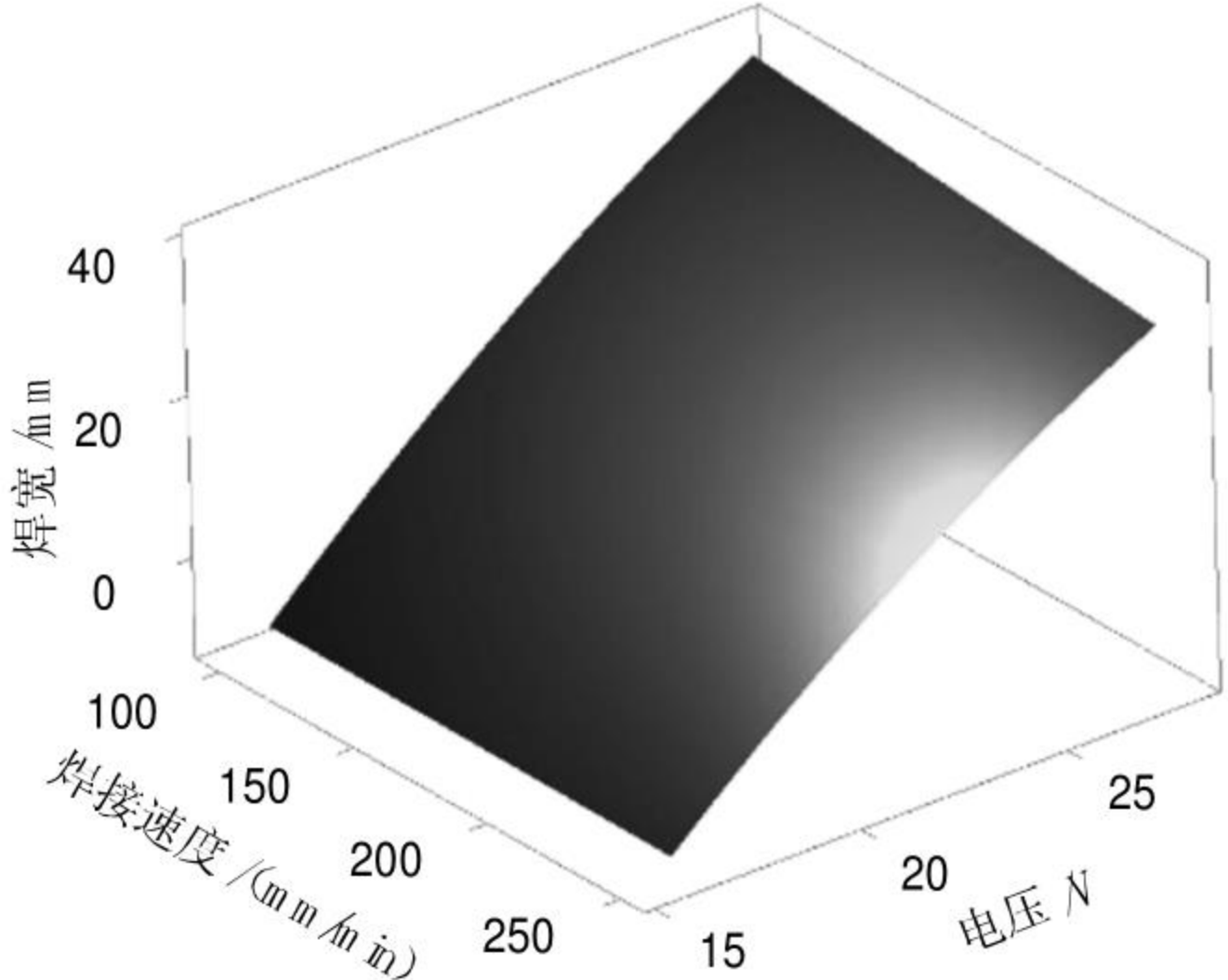


图 2 交互曲面

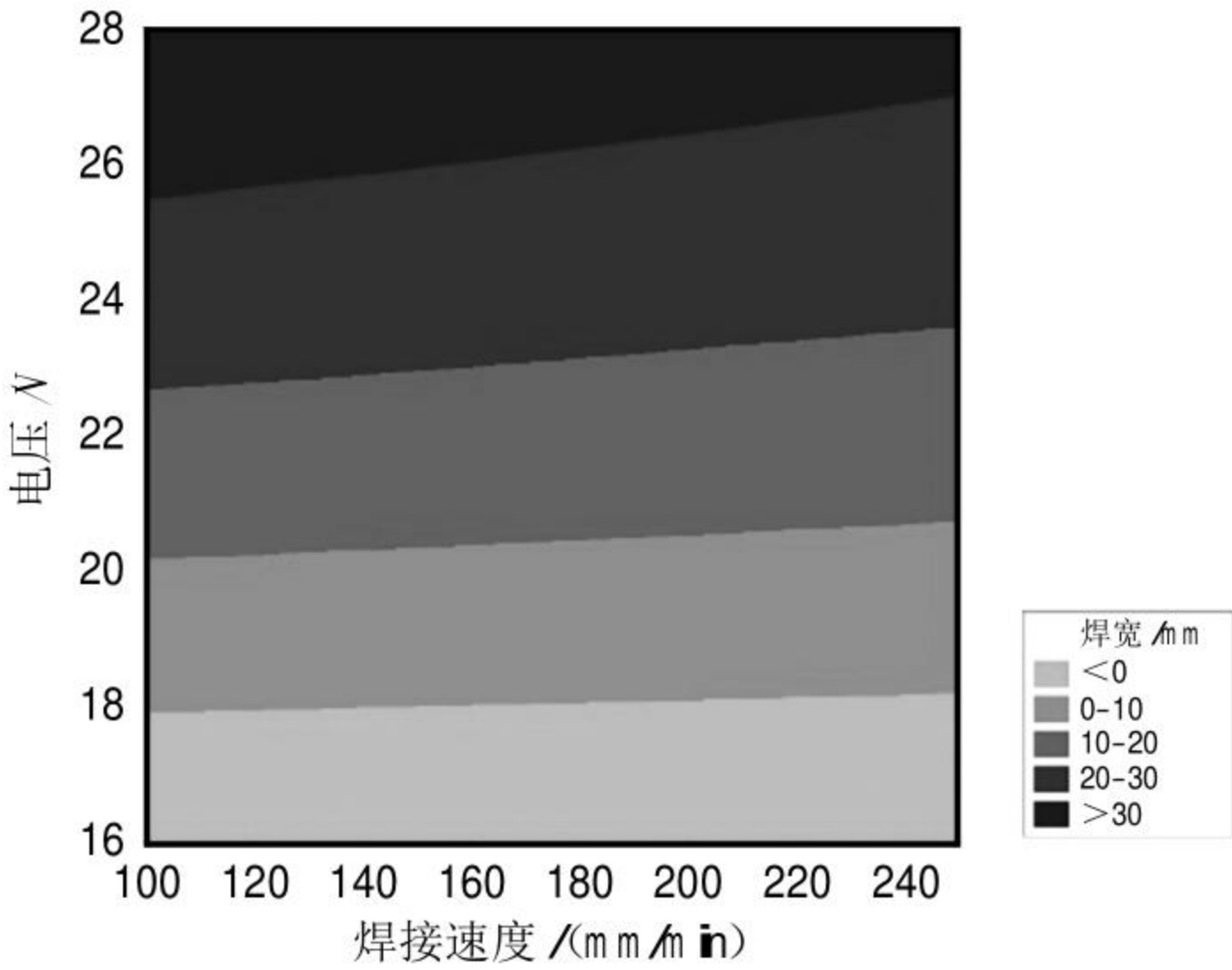


图 3 交互等值线

通过上述分析,可以得出基于 GMAW 工艺条件下焊接电流(I)、焊接电压(V)和焊接速度(v)对于焊宽(B)的线性回归方程: $B=-77.8-0.208I+7.96V+0.04012v-0.0860V^2-0.002680Vv$ 。

基于本试验得出的数据构建的多元线性回归模型在余高预测中同样展现出良好的统计性能,模型的决定性系数 R^2 为 0.913 0,证明模型与数据相关性较好。调整 R^2 值和预测 R^2 值分别为 0.891 3 和 0.851 2,

二者之差小于 0.2,因此,选择的模型能够准确地揭示工艺参数与余高的关系。方差分析中回归模型的 p 值小于 0.001,表明模型整体具有显著解释力,焊缝余高方差分析数据如表 4 所示。变量效应分析显示,焊接速度($p<0.001$)、电流($p=0.004$)和电压($p=0.008$)均对余高产生显著影响。响应规律表明,余高随电流增大而显著上升,随电压和焊接速度的增加而明显下降,余高主效应图如图 4 所示。这主要是因为 GMAW 焊接方法下,焊接电流与设备的送丝速度呈正相关,焊接电流加大时,送丝速度随之增大,从而在单位时间内更多的焊丝被熔化形成焊缝。因此,焊缝余高随之增大。同时,当焊接电压和焊接速度增加时,焊缝在单位长度内堆积的效应减弱。因此,余高也随之减小。

表 4 焊缝余高方差分析

来源	自由度	调整平方和	调整均方	F 值	p 值
回归	3	7.220 8	2.406 94	41.99	0.000
电流	1	0.708 8	0.708 76	12.37	0.004
电压	1	0.581 4	0.581 41	10.14	0.008
焊接速度	1	6.066 5	6.066 51	105.84	0.000
误差	12	0.687 8	0.057 32		
合计	15	7.908 6			

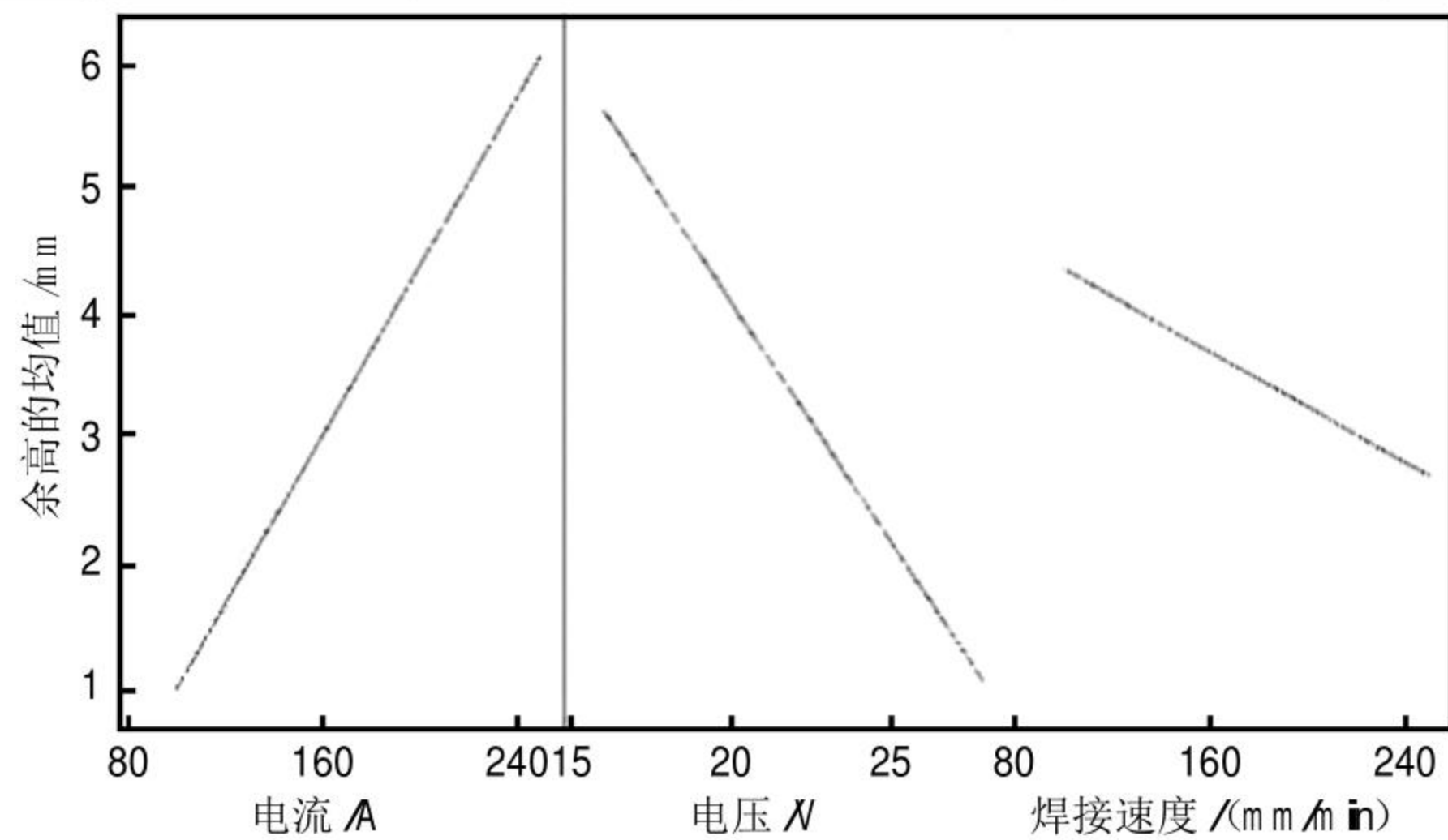


图 4 余高主效应

基于 GMAW 工艺条件下焊接电流、焊接电压和焊接速度对于余高(H)的线性回归方程为: $H=7.737+0.033\ 89I-0.38V-0.011\ 02v$ 。

3 结论

本文基于 Q355 材料使用 GMAW 焊接工艺,研究了 GMAW 工艺条件下焊接电流、焊接电压和送丝速度对于焊缝成型的影响,得到了以下结论:

1)焊接电压对于焊缝宽度的影响最为显著,焊缝宽度随着焊接电压的增加而显著增大。同时,焊缝宽度与焊接电流呈负相关,焊接电流对于焊缝宽度的影响程度较焊接电压要小。另外,对于焊缝宽度的影响,焊接电压与焊接速度的交互效应更加显著。

2)对焊缝余高的影响,焊接电压>焊接电流>焊接速度。其中,焊接电流与焊缝余高呈正相关,焊接电压、焊接速度与焊缝余高呈负相关。

3)焊缝宽度数据的调整 R^2 和预测 R^2 的精度水平均较高,相对于焊缝高度的分析数据来说,焊缝宽度的预测精度更高。由此表明,在当前研究条件下,GMAW 焊接工艺对焊缝宽度的预测模型更为合理。在进行多层、多道焊接排布策略制定时,可将焊缝宽度作为优先考虑的控制参数。

参考文献

[1] 范晨阳,胡国享,叶子昕,等.不同锻造比对 Q355D 钢力学性能、耐腐蚀性能以及耐摩擦磨损性能的影响[J].锻压技术,2025,50(6):8-17.

[2] 袁晓东,杨凤琦,刘志军,等.热输入对 Q355D 中厚板焊接接头组织及力学性能的影响[J].电焊机,2026,56(1):59-66.

[3] 张晓刚,陶飞洋,闫志峰.Q355 低碳钢焊接接头疲劳断裂行为及寿命评定[J].金属加工(热加工),2025(12):28-35.

[4] 王天琪,张树浩,龙斌,等.中厚板多层多道焊视觉测量与工艺规划[J].天津工业大学学报,2024,43(3):75-81.

[5] Fang H C,Ong S K,Nee A Y C.Adaptive pass planning and optimization for robotic welding of complex joints[J].Advances in Manufacturing,2017(2):93-104.

[6] 陈昌荣,周孙盛,何华,等.基于抛物线模型的 V 形坡口焊道规划排布[J].焊接学报,2023,44(7):79-88.

Sensitivity Study of GMAW Weld Forming Control Based on Q355 Material

Luo Bin

(Fujian Fuchuan Yifan New Energy Equipment Manufacturing Co., Ltd., Zhangzhou Fujian 363200, China)

Abstract: Welding experiments were conducted on Q355D steel plate with a thickness of 30 mm using 1.2 mm solid core welding wire GMAW process. Sensitivity research on weld seam forming size control was carried out by adjusting the welding process parameters. During this experiment, different weld bead cross-sections were obtained by adjusting welding current, voltage, and welding speed parameters while ensuring that other welding process parameters such as welding position, wire elongation, and shielding gas flow rate remained unchanged. The research results indicate that among the three factors of welding current, welding voltage, and welding speed, welding voltage has the most significant impact on weld width, followed by welding current. For weld seam height, welding voltage is also the most sensitive influencing factor, followed by welding current. At the same time, regression equations were obtained based on the welding current, welding voltage, and welding speed of GMAW welding process for the width and excess height of the weld seam according to the experimental results.

Key words: GMAW ;Q355 material;welding process parameters;forming control