

基于旋转电弧的窄间隙横焊打底工艺

张明泽, 罗雨, 叶朔朔, 苏佳毅, 于俊杰

(北京石油化工学院, 能源工程先进连接技术北京市高等学校工程研究中心, 北京 102617)

摘要: 【目的】J型铺设是最适合深水的海底管线铺设和海洋立管安装方法, 常采用管道自动焊接装备完成横向环焊缝摆动焊接。针对摆动电弧 P-GMAW 横焊打底层焊缝成形不对称、背部成形一致性差等问题, 提出了基于旋转电弧的窄间隙横焊表面张力过渡 (Surface tension transfer, STT) 打底工艺方法。【方法】以 X65 管线钢板材对接窄坡口为试验对象, 模拟深水立管 J 型铺设焊接过程。【结果】基于 Minitab 的田口方法, 建立了正交试验模型, 通过焊接工艺试验, 探究窄间隙横焊 STT 打底层焊接工艺规范及不同工艺参数组合对焊缝成形的影响规律。【结论】打底层焊缝背部成形一致性好, 无未熔合、未焊透等缺陷。

关键词: 旋转电弧焊; 窄间隙横焊; 打底工艺; 田口方法; 正交试验

中图分类号: TG444+3 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20230614002

Backing process of narrow gap horizontal welding based on rotary arc

Zhang Mingze, Luo Yu, Ye Shuoshuo, Su Jiayi, Yu Junjie

(Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Energy Engineering Advanced Joining Technology,
Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: [Objective] J-laying is the most suitable method for laying submarine pipelines and installing Marine risers in deep water. Automatic pipeline welding equipment is often used to complete horizontal girth weld by swing welding. For problems such as asymmetrical formation and poor consistency of back formation in backing weld by swing arc P-GMAW horizontal welding, backing process method of narrow gap horizontal welding surface tension transition (STT) based on rotary arc was proposed. [Methods] X65 pipeline steel sheet butt narrow bevel was taken as the test object, welding process of deep water riser J-lay was simulated. [Results] Based on Minitab-based Taguchi method, an orthogonal test model was established. Through welding process test, influence of backing process specifications of narrow gap horizontal welding STT and different combinations of welding parameters on law of weld formation was explored. [Conclusion] Back formation of backing weld had good consistency without incomplete fusion, incomplete penetration and other defects.

Key words: rotary arc welding, narrow gap horizontal welding, backing process, Taguchi method, orthogonal test

0 前言

深水油气管线铺设技术面临诸多挑战, J 型铺管法是目前所有铺管方法中最适合深水管线铺设的方法。J 型铺管架上的管段处于垂直位置, 背面不加衬垫, 常采用熔化极气体保护焊进行横向位置单面焊实现双面成形^[1-2]。打底焊作为焊接第一道工序, 焊道成形好坏直接决定后续焊接能否顺利进行。针对

横焊熔池下淌问题, 常采用控制热输入和施加力的方式解决, 降低热输入, 能使熔池冷却周期变短, 施加外力可以抵消熔池受重力的影响^[3]。旋转电弧焊和 STT 打底焊工艺在焊接生产有着广泛应用。Guo 等学者^[4]采用高帧率数码相机实时获取熔池形成图像, 观察熔池行为、熔滴传递过程, 分析了旋转电弧窄间隙横焊中典型焊缝外观缺陷的原因, 结果表明: 旋转电弧焊能减小热输入改善焊缝成形质量, 并通

收稿日期: 2023-06-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51305037, 52175286)

过试验验证了 I 形坡口旋转电弧横焊最佳工艺参数组合。路浩^[5]建立了 3 因素 4 水平正交试验模型,优化了旋转电弧 MIG 立焊和仰焊位置焊接工艺参数组合,研究表明:旋转电弧焊能促进熔滴过渡,改善侧壁未熔合等缺陷。STT 是一种受控的短路过渡工艺,采用电流控制调整热输入。冯靖等学者^[6]按照等径向力与等角度变化对管道分段,对比了 STT 打底焊等径向力幅值变化与等角度变化分段的焊道成形情况,等径向力分段方法对抑制全位置 STT 打底焊接过程中的熔池失稳流淌问题有良好效果。冷金属过渡焊接技术(Cold metal transfer, CMT)熔滴过渡时,焊接电流很小,能有效减少焊接热输入。乔丽学等学者^[7]针对 M390 和 304 不锈钢板材采用 CMT 技术进行异种金属焊接,得到了成形良好、形貌美观的焊缝。Cui 等学者^[8]采用扁平结构的摆动电弧 NG-GMAW 系统,研究摆动频率和摆动幅度对横焊焊缝成形质量的影响,结果表明:焊接接头的抗拉伸性能和硬度比母材更高,并通过试验验证了多层多道焊利用下焊道支撑上焊道实现窄间隙横焊的可行性。Mahmood 等人^[9]采用田口方法,建立了正交试验模型,研究 MIG 焊接参数组合对低碳钢板焊接接头硬度和屈服强度的影响。Ogbonna 等学者^[10]基于灰色关联分析理论,采用田口方法对 MIG 工艺参数组合进行优化,发现焊接电流和气流量变化对接头性能影响明显。

目前,还未见有学者通过田口方法研究旋转电弧窄间隙横焊 STT 打底层焊接工艺。为研究旋转电弧窄间隙横焊 STT 打底层焊接工艺,以 X65 管线钢板

材对接窄坡口为试验对象,在分析影响焊缝成形质量的主要因素基础上,采用田口方法,运用 Minitab 19 软件建立正交试验工艺参数组合模型,探究窄间隙横焊 STT 打底层焊接工艺规范及不同工艺参数组合对焊缝成形的影响规律。

1 焊接试验材料及方法

1.1 试验材料

图 1 为实现旋转电弧横焊对接窄坡口条件的焊接设备。试验所用母材为深水油气管线常用的 X65 管线钢板,试样尺寸为 600 mm×52 mm×29 mm。焊丝选用 $\phi 1.0$ mm 的 ER80S-G 型号实心气体保护焊丝,母材和焊丝具体化学成分见表 1。考虑到小角度坡口可以使得旋转电弧插入到坡口底部,具有提高焊缝熔深的效果,小钝边厚度窄坡口配合小热输入下的旋转电弧 STT 焊接工艺可以减小液态熔池停留时间^[6]。

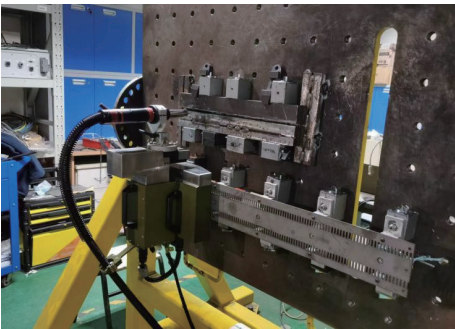


图 1 焊接设备

Fig. 1 Welding equipment

表 1 母材和焊丝化学成分(质量分数, %)

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

类别	C	Mn	P	Cu	S	Si	Ni	Mo	Cr
母材	0.09	1.60	0.02	0.30	0.004	0.35	0.30	0.30	0.25
焊丝	0.04	1.95	0.007	0.23	0.01	—	—	0.32	—

试样开成 J 形坡口,坡口角度 3° ,钝边厚度 1.6 mm,坡口半径 3.2 mm,不留间隙,如图 2 所示。保护气为 80%Ar+20%CO₂,气体流量为 30 L/min。焊前用多组磁铁吸附固定试样,试样装配后在坡口前后端点焊固定,防止焊接过程中对接窄坡口出现间隙,并用酒精擦拭坡口表面除去油污、灰尘。

1.2 试验方法

采用山东奥太全数字化 MAG-350RPL 型焊接电

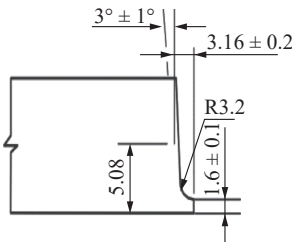


图 2 窄坡口尺寸

Fig. 2 Size of narrow bevel

源, 配上旋转电弧焊枪与自主研发的特种焊接机器人设备进行旋转电弧窄间隙横焊 STT 打底层焊接试验, 试验时采用分段方式焊接。选用一元化脉冲模式, 电弧电压、焊接电流根据电焊机设定的送丝速度自动匹配^[11]。焊接速度、弧长修正及在坡口两侧的

驻留时间等通过上位机控制系统设定。其他参数, 如焊接方向左右舷、气体流量等在焊接过程中保持不变。采用试验设计中的田口方法, 结合 Minitab 19 软件建立了 5 因素 5 水平 $L_{25}(5^5)$ 正交试验表, 具体焊接工艺参数组合见表 2。

表2 田口正交试验模型及焊后数据模型
Tab. 2 Taguchi orthogonal test model and post-welding data model

工艺 编号	送丝速度 $v_f/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	焊接速度 $v_w/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	旋转频率 f/Hz	旋转直径 D/mm	焊丝伸出长度 L/mm	焊缝成形评分 $F(0\sim 20)$	熔深 H/mm	熔宽 W/mm	钝边厚度 b/mm
1	5.8	25	5	1	10	12	9.17	6.95	1.41
2	5.8	28	10	1	11	14	8.15	6.09	1.44
3	5.8	30	15	1	12	10	6.97	6.65	1.41
4	5.8	32	20	2	13	2	3.36	5.14	1.85
5	5.8	35	25	2	14	1	8.36	5.21	1.85
6	6.0	25	10	1	13	15	7.31	5.33	1.37
7	6.0	28	15	2	14	11	4.33	3.07	1.63
8	6.0	30	20	2	10	13	3.82	5.25	1.18
9	6.0	32	25	1	11	3	2.86	6.34	1.39
10	6.0	35	5	1	12	4	5.52	7.73	1.49
11	6.2	25	15	2	11	17	5.00	5.54	1.04
12	6.2	28	20	1	12	8	5.50	5.40	1.68
13	6.2	30	25	1	13	5	6.59	5.94	1.65
14	6.2	32	5	1	14	13	9.18	6.40	1.68
15	6.2	35	10	2	10	16	6.55	4.95	0.89
16	6.4	25	20	1	14	12	8.67	5.56	1.67
17	6.4	28	25	1	10	14	8.78	6.47	1.61
18	6.4	30	5	2	11	10	7.10	5.82	0.83
19	6.4	32	10	2	12	16	6.87	6.24	0.81
20	6.4	35	15	1	13	14	8.29	5.61	1.5
21	6.6	25	25	2	12	13	5.25	6.57	0.89
22	6.6	28	5	2	13	14	9.91	6.65	1.06
23	6.6	30	10	1	14	7	8.63	5.33	1.65
24	6.6	32	15	1	10	11	8.71	5.92	1.72
25	6.6	35	20	1	11	3	4.60	5.44	1.78

2 试验结果分析

在正交试验模型的基础上, 根据研究目的确定田口方法的静态特性, 以信噪比作为衡量焊缝质量的评价指标^[12]。信噪比的计算采用望大特性, 信噪比越

大, 系统稳健性、预测性越好, 即焊缝质量越好, 预测结果也更准确, 望大特性下信噪比计算公式如式 (1) 所示, 并以此研究不同工艺参数的交互作用强度及对焊缝成形质量的影响程度, 交互作用矩阵图中平行线表示未发生交互作用, 非平行线表示发生了

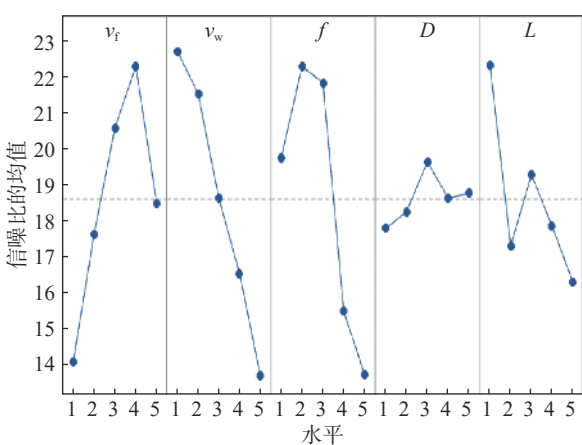
交互作用,线之间越不平行,交互作用越明显。对信噪比响应表分析,得出各工艺参数对焊缝成形质量的影响程度。标准化残差是残差值 e_i 除以其标准差的估计值,用来观测异常值,通常将大于2和小于-2的标准化残差拟合值视为较大值,即异常值,易出现畸变现象。以标准化残差指标检验不同参数组合拟合优度、畸变问题。采用以上方法分析正交试验模型,探究不同参数组合对打底焊缝成形、熔深、熔宽的影响,优化旋转电弧 STT 打底层焊接工艺规范,减少焊接缺陷。对焊后数据焊缝成形评分、熔宽和熔深的分析图形都是基于 Minitab 软件中分析田口设计生成。

$$S/N = -10\lg\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n (y_i - m)^2\right] \quad (1)$$

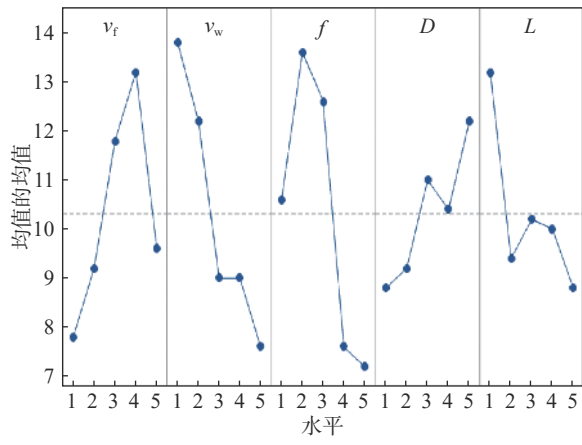
式中: y_i 为依据国标选取的焊缝成形评分、熔宽或熔深; n 为每个水平的试验次数; m 为目标值; $(y_i - m)$ 为实际与目标值之间的差异。

2.1 焊缝成形影响因素分析

主效应图曲线斜率表示工艺参数变化对焊缝成形的影响程度,斜率越大影响越明显。图3给出5个参数(送丝速度、焊接速度、旋转直径、旋转频率、及焊丝伸出长度)在相互作用下的焊缝成形评分主效应图,各参数曲线斜率依据不同的指标变化。对比图3可知:送丝速度增加,对焊缝成形影响明显,6.4 m/min 处达到峰值,焊缝成形质量最好。焊接速度增加,焊缝成形质量始终降低。旋转直径由 1 mm 增加到 2 mm,焊缝成形质量降低,且幅值变化最小。旋转频率和焊丝伸出长度分别在 10 Hz, 10 mm 处,焊缝成形质量最好。信噪比与均值主效应图的分析结果一致,则最优的一组焊接工艺参数组合是: $v_f=6.4$ m/min, $v_w=25$ cm/min, $f=10$ Hz, $D=1$ mm, $L=10$ mm。响应表排序顺序表示各参数对焊缝成形影响的主次顺序。从表3和表4中信噪比响应表排序顺序可知,各参数对焊缝成形质量影响的主次顺序依次为焊接速度、旋转频率、送丝速度、焊丝伸出长度、旋转直径。均值响应表排序顺序可知,各参数对焊缝成形质量影响程度的主次顺序依次为旋转频率、焊接速度、送丝速度、焊丝伸出长度、旋转直径。信噪比响应表与均值响应表结论不完全一致:焊接速度对信噪比影响大,对均值影响小,旋转频率对信噪比影响小,对均值影响大,旋转直径对信噪比、均值影响都小。根据田口方法的重要因子判定原则,分析认为:焊接速度对优化各参数组合下的焊缝成形效果明显,



(a) 信噪比主效应图



(b) 均值主效应图

图3 焊缝成形评分的主效应图

Fig. 3 Main effect diagram of weld forming score. (a) main effect diagram of SNR; (b) main effect diagram of mean value

表3 焊缝成形评分的信噪比响应表
Tab. 3 SNR response table of weld forming score

水平	v_f	v_w	f	D	L
1	14.11	22.72	19.77	17.80	22.34
2	17.64	21.53	22.30	18.27	17.32
3	20.60	18.63	21.84	19.65	19.29
4	22.30	16.55	15.50	18.64	17.87
5	18.49	13.72	13.74	18.78	16.32
极差	8.20	9.00	8.56	1.85	6.02
排序	3	1	2	5	4

表4 焊缝成形评分的均值响应表

Tab. 4 Mean value response table of weld forming score

水平	v_f	v_w	f	D	L
1	7.800	13.800	10.600	8.800	13.200
2	9.200	12.200	13.600	9.200	9.400
3	11.800	9.000	12.600	11.000	10.200
4	13.200	9.000	7.600	10.400	10.000
5	9.600	7.600	7.200	12.200	8.800
极差	5.400	6.200	6.400	3.400	4.400
排秩	3	2	1	5	4

旋转频率能减小各参数之间对焊缝成形影响的差异, 旋转直径是误差因子, 即焊接速度对焊缝成形影响最大, 其次是旋转频率, 旋转直径对焊缝成形影响最小。

各因子交互作用如图4所示, 其中横坐标表示各水平实际值, 纵坐标表示焊缝成形评分。当旋转直径由1 mm增加到2 mm, 旋转频率、焊接速度变化趋势一致、相互平行, 分析认为旋转直径与焊接速度、旋转频率的交互作用弱或未发生交互作用, 但对焊缝成形评分的作用增强, 即焊缝成形质量更好。送丝速度、焊接速度、旋转频率和旋转直径参数曲线都与焊丝伸出长度变化有关, 曲线相互交叉、平行度低

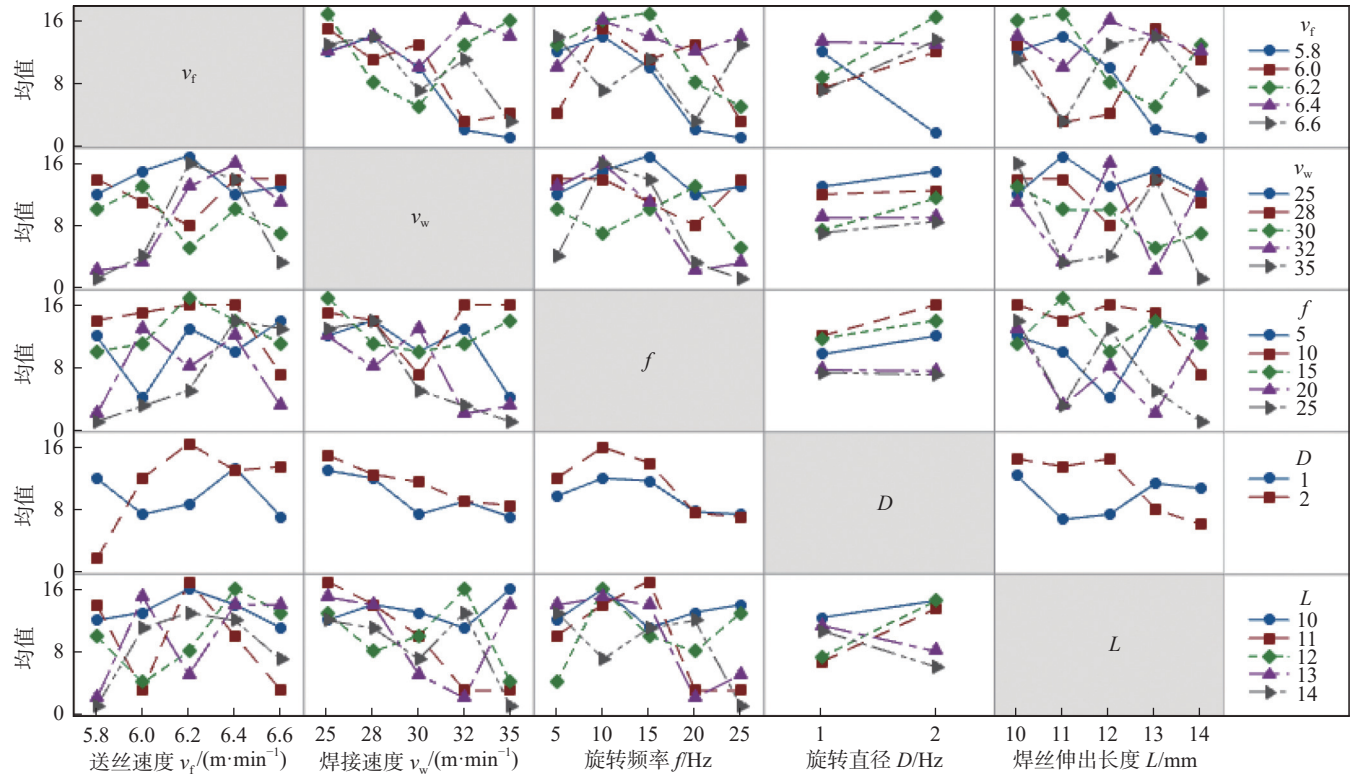


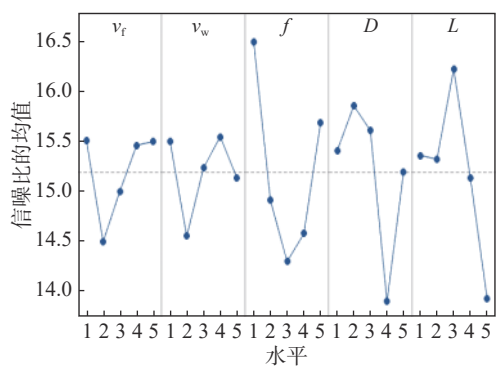
图4 各参数交互作用矩阵

Fig. 4 Interaction matrix of each parameter

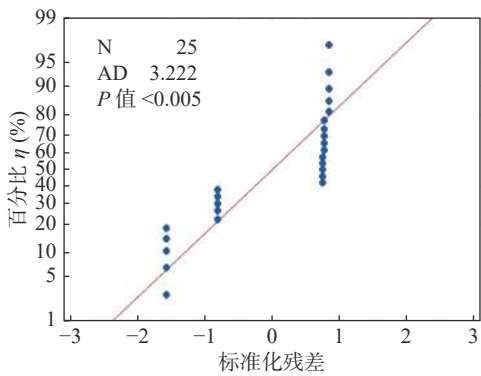
交互作用强。例如当焊接速度为25~28 cm/min时, 选取送丝速度5.8 m/min, 焊丝伸出长度11 mm为最优工艺参数组合。焊接速度为30~32 cm/min时, 选取送丝速度6.2 m/min, 旋转频率10 Hz, 焊丝伸出长度11 mm为最优工艺参数组合。从交互作用图中可以优化并预测各因子的匹配关系, 为旋转电弧窄间隙横焊STT打底层焊接提供依据。

2.2 熔宽、熔深影响因素分析

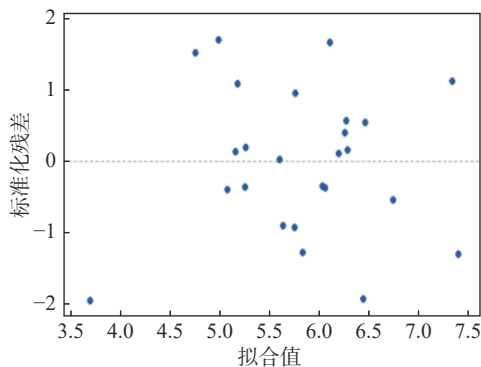
熔宽、熔深影响因素的分析结果如图5和图6及表5和表6所示。由图5(a)、图6(a)可知, 各参数增加, 熔宽、熔深整体呈先减小后增大趋势。旋转频率增加, 熔宽在15 Hz处最小, 熔深在20 Hz处最小, 并结合表5、表6可知, 旋转频率对熔宽、熔深的调节作用明显。旋转直径由1 mm增加到2 mm, 焊缝熔宽、



(a) 信噪比主效应图



(b) 熔宽正态概率图

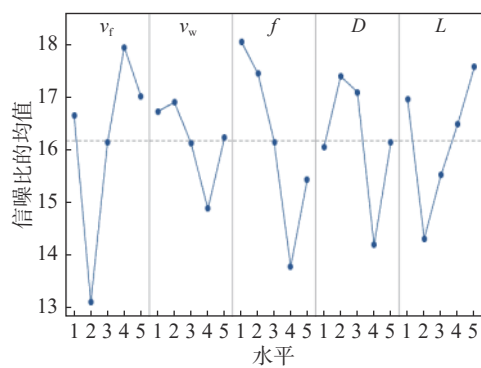


(c) 熔宽信噪比标准化残差图

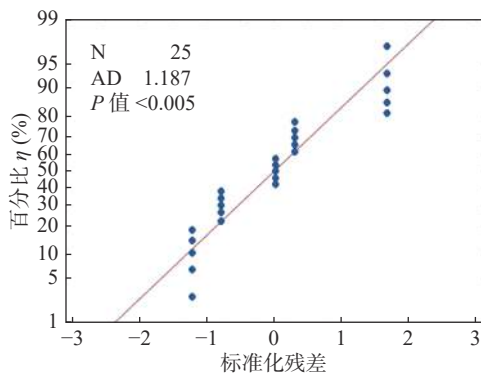
图 5 熔宽影响因素分析

Fig. 5 Analysis of influence factors of weld width. (a) SNR main effect diagram of weld width; (b) normal probability diagram of weld width; (c) standardized residual diagram of weld width

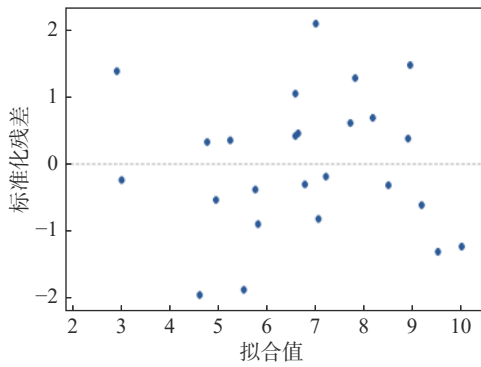
熔深均减小, 分析认为: 在实际焊接过程中, 受 J 形窄坡口限制, 旋转电弧旋转直径增大, 导致焊丝端部在试样侧壁起弧、侧壁热输入大, 焊缝中心线附近受热循环影响减小, 严重影响焊道熔深、背部成形。以熔宽为响应送丝速度的斜率变化小, 以熔深为响应送丝速度斜率变化很大, 认为送丝速度对熔宽的调节作用不明显, 对熔深调节作用明显, 与信噪比响应表



(a) 信噪比主效应图



(b) 熔深正态概率图



(c) 熔深信噪比标准化残差图

图 6 熔深影响因素分析

Fig. 6 Analysis of influence factors of penetration. (a) SNR main effect diagram of penetration; (b) normal probability diagram of penetration; (c) standardized residual diagram of penetration

的排列顺序分析结果一致。对比各参数变化对熔宽、熔深幅值的影响可知, 焊接速度增加, 熔宽、熔深的幅值变化最小, 焊接速度对熔宽、熔深影响小。从表 5 和表 6 可知, 焊丝伸出长度对熔宽的调节作用最明显, 送丝速度对熔深的影响最明显。焊丝伸出长度逐渐增加, 在 12 mm 处熔宽最大, 在 11 mm 处熔深最小, 越过拐点, 能够减小熔宽, 增大熔深。由图 5(b)、图 6(b)

表5 熔宽信噪比响应表
Tab. 5 SNR response table of weld width

水平	v_f	v_w	f	D	L
1	15.51	15.50	16.50	15.41	15.36
2	14.50	14.55	14.91	15.86	15.32
3	15.00	15.23	14.30	15.61	16.22
4	15.46	15.55	14.58	13.90	15.13
5	15.50	15.14	15.68	15.19	13.93
极差	1.01	1.00	2.20	1.96	2.30
排序	4	5	2	3	1

表6 熔深信噪比响应表
Tab. 6 SNR response table of penetration

水平	v_f	v_w	f	D	L
1	16.66	16.73	18.06	16.05	16.98
2	13.12	16.91	17.46	17.40	14.32
3	16.15	16.13	16.15	17.10	15.53
4	17.95	14.89	13.80	14.20	16.50
5	17.02	16.25	15.44	16.15	17.58
极差	4.83	2.02	4.26	3.20	3.26
排序	1	5	2	4	3

熔深、熔宽的正态概率标准化残差分布可知,各点分布不成一条直线,说明不同焊接工艺参数相互配合,但不成正态分布。由图 5(c)、图 6(c) 可知,熔宽在 3.5 ~ 4.0 mm, 6.0 ~ 6.5 mm 之间,熔深在 5 mm, 7 mm 附近,标准化残差值接近 ± 2 ,易出现畸变现象,对应焊缝质量不满足焊缝使用的国标等级要求,在实际焊接过程中应避免此处的工艺参数组合。

2.3 熔透率影响因素分析

针对旋转电弧横焊 STT 打底层焊接,焊接参数组合不变时,背部焊缝一致性差,出现未熔合、未焊透等现象,考虑焊缝成型的主要影响因素基础上,研究熔透率与坡口钝边厚度的关系。由于坡口采用铣床机械加工,导致钝边厚度存在加工误差,试验前应先使用游标卡尺测量钝边厚度,将相近钝边厚度的坡口进行组对,测量结果见表 2。熔透率是焊透长度与焊接长度的百分比。根据钝边厚度变化对熔透率的影响,绘制二者关系的散点图,得出拟合回归曲线

方程,如图 7 所示。从图 7 中可知,在不同焊接工艺参数组合下,坡口钝边厚度的增加,熔透率减小,1.5 mm 处熔透率断崖式下降。分析认为 1.5 mm 钝边厚度是出现未焊透焊道的临界值,越过临界值,熔透率很小,熔透效果差甚至整条焊道无法双面成形。

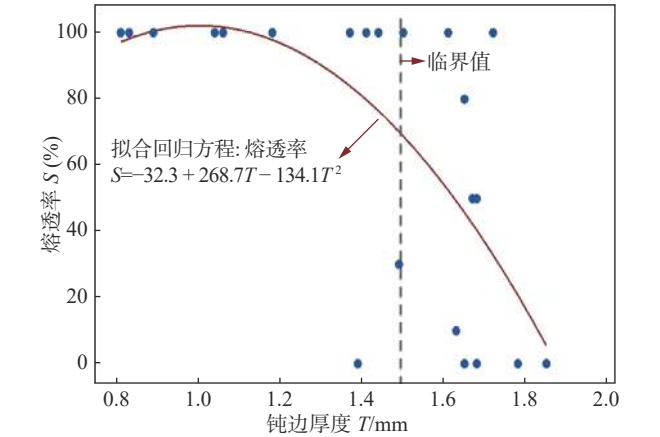


图 7 钝边厚度变化与熔透率之间的关系
Fig. 7 Relationship between thickness change of root face and penetration rate

3 试验结果

利用上述分析结果进行焊接试验,焊接工艺参数取 $v_f=6.4$ m/min, $v_w=25$ cm/min, $f=10$ Hz, $D=1$ mm, $L=10$ mm。坡口组对的错边量控制在 0.5 mm 范围内。焊接过程中实时调整焊接机器人位置,使焊丝始终与焊缝中心线重合,上位机调整焊接设备行走方向由左向右行驶,旋转电弧电机调整为逆时针方向旋转,试验结果如图 8(a)、图 8(b) 所示。取垂直于焊接方向的截面作为金相观察面,观察横焊接头宏观组织形貌,如图 8(c) 所示。

从图 8(a)、图 8(b) 可知,打底焊道背部成形一致性好,无未熔合、未焊透等缺陷。试样腐蚀后区域分界明显,旋转电弧横焊接头表现出不对称性,焊缝截面为“漏斗状”,呈外壁宽、内壁窄形貌,如图 8(c) 所示。旋转电弧起弧的瞬间,形成高温熔池,随着热输入增加,金属熔化量增加,外壁熔宽增大。焊接速度快、旋转电弧旋转使热量散失加快,熔池存在时间短,在熔深方向,熔池内金属液体对流作用减弱,致使内壁熔宽变窄,焊道呈外壁宽、内壁窄形貌^[13]。由于焊丝的旋转,焊丝在上侧壁的相对运动速度小于下侧壁,使得上侧壁的热输入大于下侧壁,导致上侧壁比

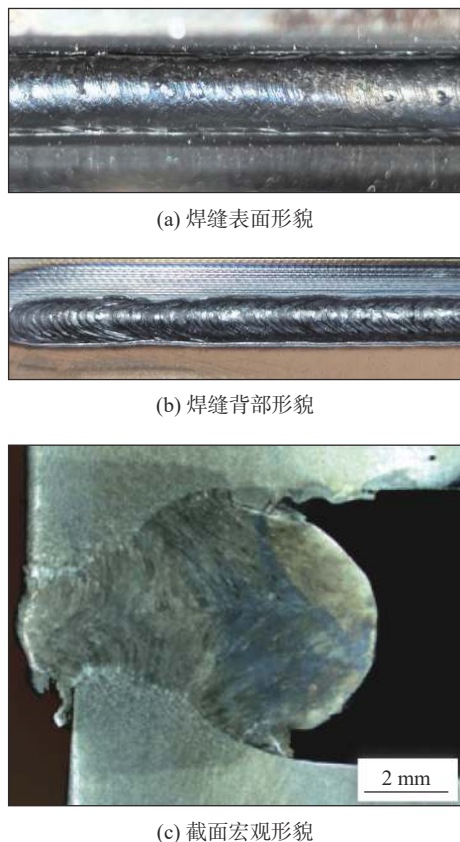


图8 平板对接焊缝形貌

Fig. 8 Morphology of plate butt weld. (a) surface morphology of weld; (b) back morphology of weld; (c) macroscopic morphology of cross-section

下侧壁的熔宽大。焊缝中心线以下区域由于重力影响,形状饱满。焊缝表面形貌、截面宏观组织形貌均达到预期效果,从而验证了田口方法正交模型的正确性。

4 结论

(1)利用田口方法,对旋转电弧J形窄坡口横焊STT打底工艺进行了研究,建立了正交试验模型,分析了熔宽、熔深等焊缝成形评价指标,结果表明最佳参数组合为 $v_f=6.4$ m/min, $v_w=25$ cm/min, $f=10$ Hz, $D=1$ mm, $L=10$ mm,焊接速度对焊缝成形影响最大,对熔宽、熔深影响最小,焊丝伸出长度对熔宽影响最大,送丝速度对熔深影响最大,对焊缝成形影响最小的是旋转直径。1.5 mm钝边厚度是背部出现未焊透焊道的临界值。熔宽在3.5~4.0 mm,6.0~6.5 mm之间,熔深在5 mm,7 mm附近焊缝质量易发生畸变。

(2)采用最佳工艺参数组合进行焊接试验,结果表明打底焊道背部成形一致性好,无未熔合、未焊透

等缺陷。观察截面宏观组织形貌表明旋转电弧STT打底层横焊焊道呈现不对称性,具有内壁窄、外壁宽,上侧壁比下侧壁熔宽大的特点。焊缝表面形貌、截面宏观组织形貌均达到预期效果,验证了田口方法正交模型的正确性。

参考文献

- [1] 周灿丰,陈智,焦向东,等. API X65 管道深水铺设 GMAW 横向焊接温度场 [J]. 焊接学报, 2020, 41(9): 60 – 68.
Zhou Canfeng, Chen Zhi, Jiao Xiangdong, et al. Study on temperature field of GMAW horizontal welding for deep water laying of API X65 pipe[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(9): 60 – 68.
- [2] 周灿丰,焦向东,陈家庆,等. 海底管道 J 形铺设焊接技术 [J]. 焊接, 2019(8): 21 – 24.
Zhou Chanfeng, Jiao Xiangdong, Chen Jiaqing, et al. Sub-sea pipeline J-lay welding technology[J]. Welding & Joining, 2019(8): 21 – 24.
- [3] 郭宁,林三宝,张亚奇,等. 旋转电弧横向 GMAW 接头组织及成形特点 [J]. 焊接学报, 2009, 30(8): 101 – 104.
Guo Ning, Lin Sanbao, Zhang Yaqi, et al. Microstructure and formation characteristics of rotating arc horizontal GMAW joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(8): 101 – 104.
- [4] Guo Ning, Wang Meirong, Guo Wei, et al. Study on forming mechanism of appearance defects in rotating arc narrow gap horizontal GMAW [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75: 15 – 20.
- [5] 路浩. 管道全位置旋转电弧窄坡口焊接工艺研究 [D]. 北京: 北京石油化工学院, 2020.
Lu Hao. Research on narrow groove welding technology of full position rotating arc in pipeline [D]. Beijing, China: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2020.
- [6] 冯靖,武少杰,高洪明,等. 基于熔池受力的全位置 STT 打底焊分段工艺 [J]. 焊接, 2022(2): 1 – 5, 17.
Feng Jing, Wu Shaojie, Gao Hongming, et al. Subsection process of all-position STT backing welding based on the force in molten pool[J]. Welding & Joining, 2022(2): 1 – 5, 17.
- [7] 乔丽学,曹睿,车洪艳,等. M390 高碳马氏体不锈钢与 304 奥氏体不锈钢 CMT 对接焊连接机理 [J]. 材料导报, 2023, 37(7): 196 – 201.
Qiao Lixue, Cao Rui, Che Hongyan, et al. CMT butt welding mechanism of M390 martensitic stainless steel and 304 austenitic stainless steel[J]. Materials Reports, 2023, 37(7): 196 – 201.
- [8] Cui H C, Jiang Z D, Tang X H, et al. Research on narrow-

- gap GMAW with swing arc system in horizontal position[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 74: 297 – 305.
- [9] Mahmood N Y, Alwan A H. Mechanical properties improvement of MIG welding steel sheets using Taguchi method[J]. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 20(1): 66 – 73.
- [10] Ogbonna O S, Akinlabi S A, Madushele N, et al. Grey-based taguchi method for multi-weld quality optimization of gas metal arc dissimilar joining of mild steel and 316 stainless steel[J]. *Results in Engineering*, 2023, 17: 100963.
- [11] 徐起, 唐新华, 刘国强, 等. 电弧摆动对窄间隙 GMAW 横焊打底焊道成形的影响 [J]. *焊接*, 2020(1): 13 – 20.
- Xu Qi, Tang Xinhua, Liu Guoqiang, et al. Influence of arc-swing on backing bead formation of narrow-gap GMAW in horizontal position[J]. *Welding & Joining*, 2020(1): 13 – 20.
- [12] 毛志伟, 徐伟, 周少玲, 等. 基于田口方法旋转电弧焊接工艺参数优化 [J]. *热加工工艺*, 2016, 45(11): 169 – 173.
- Mao Zhiwei, Xu Wei, Zhou Shaoling, et al. Optimization of rotating arc welding parameters using Taguchi method[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(11): 169 – 173.
- [13] 蒋爽, 江国业. 高功率激光焊接 X65 管线钢的接头组织与性能 [J]. *热加工工艺*, 2023, 52(19): 111 – 114.
- Jiang Shuang, Jiang Guoye. Microstructure and properties of X65 pipeline steel joint welded by high power laser[J]. *Hot Working Technology*, 2023, 52(19): 111 – 114.

第一作者: 张明泽, 硕士研究生; 主要从事焊接装备自动化与智能化研究; 1622484257@qq.com。

通信作者: 罗雨, 博士, 副教授; 主要从事特种焊接机器人、焊接装备自动化及智能化的研究; 已发表论文 20 余篇; luoyu@bipt.edu.cn。

(编辑: 王龙权)

本文引用格式:

张明泽, 罗雨, 叶朔朔, 等. 基于旋转电弧的窄间隙横焊打底工艺[J]. *焊接*, 2024(6): 17 – 25.

Zhang Mingze, Luo Yu, Ye Shuoshuo, et al. Backing process of narrow gap horizontal welding based on rotary arc[J]. *Welding & Joining*, 2024(6): 17 – 25.

(上接第 16 页)

- [11] 赵兴民, 赵建平, 燕集中. 高密度聚乙烯管热熔焊接接头本构模型研究 [J]. *中国塑料*, 2021, 35(4): 65 – 71.
- Zhao Xingmin, Zhao Jianping, Yan Jizhong. Study on constitutive model for butt fusion welded joint of high-density polyethylene pipe [J]. *China Plastics*, 2021, 35 (4): 65 – 71.
- [12] 杨绪逢, 徐善军. 聚乙烯管道热熔对接焊接工艺研究 [J]. *工程与试验*, 2021, 61(1): 97 – 100.
- Yang Xufeng, Xu Shanjun. Study on butt fusion joining procedure for polyethylene pipe[J]. *Engineering & Test*, 2021, 61(1): 97 – 100.
- [13] 何慧娟. 含缺陷聚乙烯燃气管道热熔接头力学性能研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- He Huijuan. Study on mechanical properties of hot melt joint of gas pipeline containing defective polyethylene [D]. Chengdu, China: Southwest Petroleum University, 2015.
- [14] Leskovics K, Kollár M, Barczy P. A study of structure and mechanical properties of welded joints in polyethylene pipes [J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2006, 419(1/2): 138 – 143.
- [15] 闵文. 含工艺缺陷 PE 管道热熔焊接接头失效机理分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
- Min Wen. An analysis on failure mechanism of polyethylene pipe butt fusion joints with process defect [D]. Harbin, China: Harbin University of Science and Technology, 2015.

第一作者: 陶静, 博士; 主要从事机械优化设计、控制系统设计与研发; taojing@suse.edu.cn。

(编辑: 王龙权)

本文引用格式:

陶静, 栗昌鹏, 薛寒, 等. 基于伺服电机的 PE 管全自动热熔焊机控制系统研制[J]. *焊接*, 2024(6): 9 – 16, 25.

Tao Jing, Li Changpeng, Xue Han, et al. Development of control system of PE tube automatic hot melt welding machine based on servo motor[J]. *Welding & Joining*, 2024(6): 9 – 16, 25.