

引用格式: 罗雨, 任飞燕, 黄子祥, 等. Tandem 双丝共熔池窄坡口管道焊接平焊工艺研究[J]. 热加工工艺, 2026, 55(8): 197-203. LUO Yu, REN Feiyan, HUANG Zixiang, et al. Study on Flat Welding Process of Narrow Bevel Pipe in Tandem Dual Wire Co-melt Pool [J]. Hot Working Technology, 2026, 55(8): 197-203.
DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20242432

Tandem 双丝共熔池窄坡口管道焊接平焊工艺研究

罗雨, 任飞燕, 黄子祥, 冯艳, 钱学芝

(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: Tandem 双丝焊接技术是提高焊接效率的有效方式之一。针对目前管道焊接效率低、焊接时侧壁与母材融合不好、焊缝成型质量不稳定等问题, 提出了 Tandem 双丝共熔池窄坡口焊接的工艺方法。以 X65 钢材为实验母材, 基于 Minitab 的田口方法开展焊接实验, 探究送丝速度、焊接速度及弧长修正的不同工艺参数组合对焊缝成形的影响规律。结果表明: 当送丝速度 $v_f=4.4$ m/min、焊接速度 $v_w=26$ cm/min、弧长修正 $\eta=8\%$ 时可得到成形良好的焊缝。该研究也为后续 Tandem 双丝共熔池窄坡口管道全位置焊接奠定基础。

关键词: Tandem 双丝共熔池; 平焊位置; 田口方法; 工艺研究

中图分类号: TG444.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2026)08-0197-07

Study on Flat Welding Process of Narrow Bevel Pipe in Tandem Dual Wire Co-melt Pool

LUO Yu, REN Feiyan, HUANG Zixiang, FENG Yan, QIAN Xuezhi

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

Abstract: Tandem dual-wire welding technology is one of the effective welding methods to improve welding efficiency. Aiming at the current problems of low pipeline welding efficiency, poor fusion of sidewall and base material during welding, and unstable weld molding quality, the process method of Tandem dual-wire co-melt pool narrow bevel welding was proposed. X65 steel as the test base material, based on Minitab's Taguchi method to carry out the entire welding test, the influence of the combination of wire feeding speed, welding speed and arc length correction of the process parameters on the weld forming law were explored. The results show that, a well-formed weld can be obtained when the wire feeding speed is $v_f=4.4$ m/min, the welding speed is $v_w=26$ cm/min and the arc length correction is $\eta=8\%$. This study also lays the foundation for the subsequent all-position welding of narrow beveled pipes with Tandem dual-wire co-melt pool.

Key words: tandem dual-wire co-melt pool; flat welding position; taguchi method; process study

随着焊接技术的不断发展, 对焊接效率的要求越来越高, 双丝及多丝焊接技术已成为焊接行业的研究热点。为更好的将 Tandem 双丝共熔池窄坡口焊接技术应用于管道领域, 必须先深入研究 Tandem 双丝在平焊位置的焊接工艺, 从而为其他空间位置焊接工艺规范的确立奠定基础。

窄坡口管道焊接普遍使用单丝焊接, 单丝焊接的焊接效率远低于双丝焊接。钟蒲等^[1]研究 Tri-Arc

双丝三电弧焊接中各弧之间耦合情况, 使其形成特定的电弧形态以获得更低的焊接输入和更高的熔覆效率。陶星空等^[2]研究了中厚板焊接中采用脉冲双丝打底焊的成形效果, 分析了焊接速度对焊接形貌、电弧形态以及焊接过程稳定性的影响, 发现焊接速度对电弧偏移影响不大; 且在主丛丝的特定周期摆动规律下, 双丝焊接有助于改善焊缝成形度。Mahmood 等^[3]通过田口分析的方法, 建立了 MIG 焊接参数的正交实验模型, 探究了在不同焊接参数的组合下低碳钢板焊接接头质量的变化规律。赵博等^[4]研究了双丝共熔池焊接焊丝与侧壁间距和双丝倾角对焊缝成形的影响, 发现减小焊丝与侧壁间距, 可以增大侧壁熔深, 双丝倾角为 0 时, 焊缝表面下凹量最大。范成磊等^[5]研究了双丝气体保护焊的稳定性, 发

收稿日期: 2024-12-11 修回日期: 2025-10-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51305037, 52175286)

作者简介: 罗雨, 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要研究方向: 管道智能化焊接; E-mail: luoyu@bipt.edu.cn

通讯作者: 任飞燕, 女, 硕士研究生, 主要从事焊接装备自动化与智能化研究; E-mail: 2567844149@qq.com

现当双丝间距小于 15 mm 时,电弧处于共熔池状态,焊接过程稳定。张锋等^[6]以 X80 管线钢为研究对象,依据双丝焊接原理研制了管道全位置单枪双丝自动焊接系统,制定了“根焊+全位置自动填充焊+盖面焊”的焊接工艺方案。杨东青等^[7]研究了双丝排列角度对熔化极气体保护焊熔滴过渡行为的影响,发现双丝排列角度不小于 45°,熔池铺展性好,双丝的熔滴过渡相互作用较小。吴东亭^[8]研究了旁路耦合双丝间接电弧焊,将双丝间接电弧焊阴极焊丝与被焊工件直接连接在一起,形成旁路耦合双丝间接电弧焊,解决了焊接工艺窗口窄、熔合不良等工艺缺陷。Ogbonna 等^[9]通过混合灰色理论田口分析的方法,探究低碳钢和奥氏体不锈钢焊接接头的多性能优化,依据焊缝融合区的抗拉强度、维氏硬度等评价标准评估了焊接接头的性能。

以上学者的研究表明,Tandem 双丝共熔池窄坡口焊接技术有广阔的应用前景,能较好地提升焊接效率。本文采用田口分析的方法,针对 Tandem 双丝平焊实验数据进行分析,探究 Tandem 双丝共熔池窄坡口管道焊接平焊位置的工艺规范,以及不同工艺参数组合对焊缝成形的影响规律;并通过理论分析,最终得出平焊位置焊缝成形质量最佳的工艺参数组合,为后续 Tandem 双丝共熔池窄坡口管道全位置焊接奠定基础。

1 焊接实验设备、材料及方法

1.1 焊接设备

图 1 为 Tandem 双丝共熔池整体焊接实验系统。整个系统包括全位置变位机、Tandem 双丝焊枪、实验室自研焊接小车、TPS 4000 主从同步和全数字化微处理器电源以及 80%Ar+20%CO₂ 保护气体。焊枪通过定位板安装在焊接小车前端,将实验板材调整至平焊位置,连接焊接电源、气瓶及送丝装置即可进行焊接工作。

1.2 实验材料

选取油气输送管道常用的 X65 管线钢为试验材料,在铣床上铣出 60 mm×30 mm×15 mm 的钢板作为焊接试样。焊接试样的坡口尺寸如图 2 所示。坡

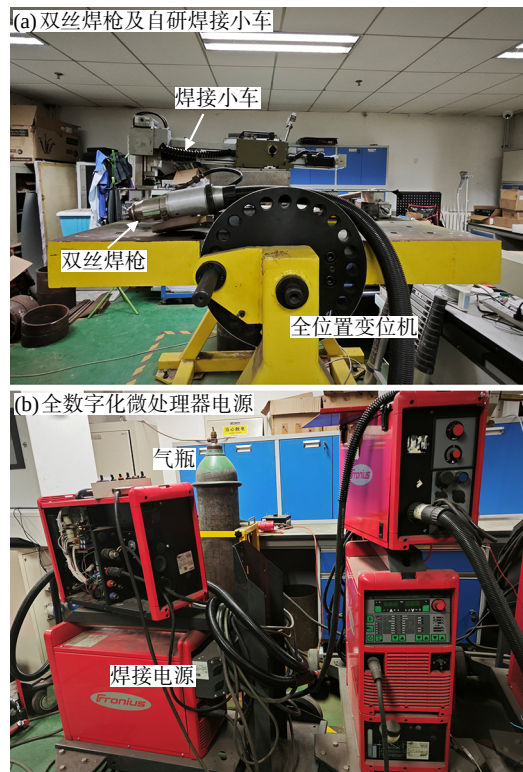


图 1 Tandem 双丝共熔池整体焊接实验系统
Fig.1 Monolithic welding test system of Tandem dual-wire co-melt pool

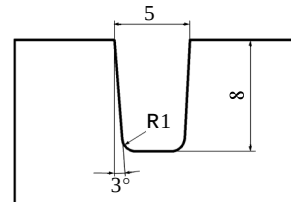


图 2 焊接试样的坡口尺寸(mm)
Fig.2 Welded sample groove size (mm)

口形式为深 U 形坡口,坡口深度 13 mm,选用 U 形坡口可避免因尖角产生的热量扩散不均匀,且更好的模拟真实焊缝中的热量流动,从而避免出现焊接缺陷。焊丝有主丝和从丝,均采用直径为 1 mm 的 ER80S-G 实芯焊丝,主从丝的焊接工艺参数相同。母材及焊丝的化学成分见表 1。

1.3 实验方法

将 Tandem 双丝焊枪安装至焊接小车上,小车沿既定轨道从左向右行走完成对板材的焊接。调整两个导电嘴的排列角度,将焊丝夹角设定为 30°、间距

表 1 母材及焊丝的化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of base metal and welding wire (wt%)

成分	C	Mn	P	S	Si	Nb	V	Ti	Mo	Cr	Ni	Al	N	Cu	Fe
X65(母材)	0.09	1.60	0.02	0.004	0.35	0.06	0.06	0.025	0.30	0.25	0.30	0.06	0.009	0.03	余量
ER80S-G(焊丝)	≤0.1	1.1~1.6	≤0.025	≤0.02	≤0.6	-	-	-	-	0.2~0.6	0.2~0.6	-	-	≤0.5	余量

为 2mm,以确保足够的侧壁熔深。Tandem 双丝焊枪如图 3 所示。双丝前后排列在坡口的中央,防止焊缝出现偏移。经过前期焊接实验摸索,将双丝送丝速度设置相同,使得焊件焊缝成形均匀,焊接平稳程度较高;双丝干伸长设为相同,选取 10、14、16、18、22 mm 依次进行焊接实验摸索,发现干伸长 10mm 时,焊接过程中飞溅容易粘连在导电嘴上;当伸长 14mm 时,坡口底部出现了直径较大气孔;当伸长 16mm 时,焊缝成形良好,焊道分布均匀;当伸长 18mm 时,坡口中间出现凸起;当伸长 22mm 时,由于保护气罩与焊道之间的距离过远,保护气体不能再对熔池进行很好的保护,因此将焊丝干伸长设为 16mm。



图 3 Tandem 双丝焊枪图
Fig.3 Diagram of Tandem dual wire torch

选择送丝速度、焊接速度以及弧长修正这 3 个焊接参数进行实验,通过调整这 3 个参数的变化,得到 25 组焊缝。实验结束后,采用锯床和线切割结合的方式进行试样切割,然后对焊缝进行金相研磨,测量焊缝切面的金相组织,得到了 25 组焊缝数据。

评价焊缝成形好坏的指标有很多,在本实验中选取焊缝熔深、焊缝熔宽、侧壁熔深以及焊趾角作为参考指标。在实际测量中,由于焊趾角不便测量,选用 corner angle(焊趾角补角)来测量。使用 Minitab 中的田口分析方法进行数据分析,在该方法中,焊缝质量评分也是重要的因素。依据焊缝成形是否连续,焊缝余高余宽是否稳定,有无焊接缺陷等条件给上述 25 组实验焊件进行打分,打分越高,代表焊缝质量越好。焊缝表面成形质量评价标准见表 2,平焊实验数据见表 3。

2 实验结果分析

在正交实验模型的基础上,根据研究目的确定田口方法的静态特性,本实验选择以信噪比作为衡量焊缝质量的评价指标,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

表 2 焊缝表面成形质量评价标准
Tab.2 Evaluation standard of weld surface forming quality

焊缝成形质量评价标准	评价分数 / 分
焊缝成形连续美观,边缘平齐,表面干净无飞溅; 焊缝余高余宽稳定,焊缝整体无凹凸不平, 满足 GB1 级标准;	16~20
焊缝成形连续,部分焊缝存在轻微的下塌;焊缝表面 无明显凹凸不平 and 草刺,满足 GB2 级标准;	11~15
焊缝成形基本连续,表面允许有一定程度的凹凸不平 和草刺存在;焊缝宽度不均匀,满足 GB3 级标准;	6~10
焊缝成形不连续,出现较多焊接缺陷;不满足 GB 标准;	0~5

表 3 平焊实验数据表
Tab.3 Flat welding test data sheet

实验 组号	送丝速度 /(mm·min ⁻¹)	焊接速度 /(cm·min ⁻¹)	弧长 修正 (%)	熔深 /mm	熔宽 /mm	侧壁 熔深 /mm	焊趾 角补角 /(°)	成形 打分 (0~20 分)
1	4.2	30	2	2.87	2.87	0.68	63.0	18
2	4.2	28	4	2.96	3.99	0.10	37.0	5
3	4.2	26	6	3.24	4.22	0.83	20.0	9
4	4.2	24	8	3.26	4.47	0.81	32.0	14
5	4.2	32	10	2.64	2.85	0.10	53.0	12
6	4.4	30	6	2.55	3.36	0.63	50.5	17
7	4.4	28	8	2.62	3.68	0.60	61.5	15
8	4.4	26	10	2.34	3.50	0.018	80.0	14
9	4.4	24	2	2.56	2.96	0.44	52.5	11
10	4.4	32	4	2.56	3.69	0.87	26.0	8
11	4.6	30	10	3.23	4.02	0.44	38.5	4
12	4.6	28	2	3.04	4.37	0.84	27.0	10
13	4.6	26	4	2.79	3.78	0.65	30.0	11
14	4.6	24	6	2.91	4.02	0.075	76.5	8
15	4.6	32	8	3.82	2.2	0.04	42.0	6
16	4.8	30	4	2.52	3.58	0.13	60.0	9
17	4.8	28	6	2.87	3.38	0.13	59.0	3
18	4.8	26	8	3.52	3.75	0.07	64.5	5
19	4.8	24	10	3.84	3.35	0.33	27.0	9
20	4.8	32	2	3.22	4.71	0.87	27.0	7
21	5.0	30	8	3.31	3.62	0.38	48.5	2
22	5.0	28	10	3.12	3.87	0.61	36.0	8
23	5.0	26	2	3.16	4.32	0.82	30.0	10
24	5.0	24	4	3.09	5.58	0.62	39.0	1
25	5.0	32	6	2.75	3.61	0.80	40.0	13

量越好,预测结果也更准确。信噪比(S/N)公式为

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

式中: y_i 为焊缝成形质量得分; n 为实验次数; m 为目标值。

2.1 焊缝成形质量影响因素分析

结合 Minitab 软件中的田口方法,建立 3 因素 5

水平正交实验表。绘制出送丝速度、焊接速度与弧长修正 3 个因素对焊缝成形质量的影响,即绘制以上 3 个因素的信噪比图,其中送丝速度用 A 表示、焊接速度用 B 表示、弧长修正用 C 表示。

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。该图表述了送丝速度、焊接速度以及弧长修正对焊缝成形的影响。信噪比主效应图如图 4 所示,均值主效应图如图 5 所示。从整体来看,信噪比主效应图被分为 3 个部分,A 部分指送丝速度对焊缝成形的影响,横坐标的 1~5 分别表示实验数据表中对应的送丝速度栏中 4.2、4.4、4.6、4.8、5.0 m/min 这 5 组数据,而纵坐标则表示该数据下的实验所对应的焊缝成形分数。同理,B 部分表征为焊接速度对焊缝成形的影响,横坐标表示焊接速度从 24 cm/min 变化到 32 cm/min,每变化两个分度为横坐标的 1 个刻度;C 部分表示弧长修正对焊缝成形的影响规律,弧长修正分别为 2%、4%、6%、8%和 10%这 5 个刻度。

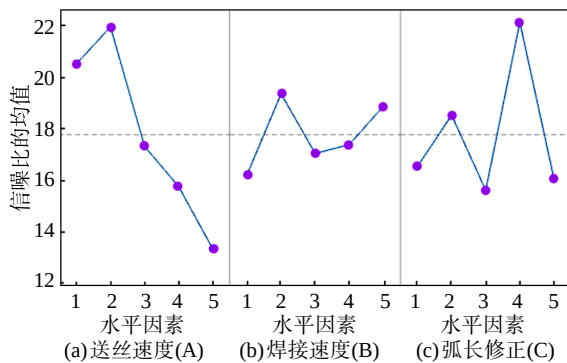


图 4 信噪比主效应图

Fig.4 Main effect plot of signal-to-noise ratio

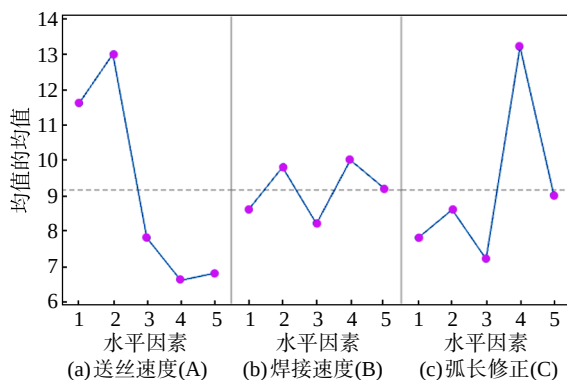


图 5 均值主效应图

Fig.5 Main effect plots mean

从图 4、5 中可以明显看出,送丝速度对焊缝成形影响较为规律,当送丝速度为 4.4 m/min 时,焊缝成形质量达到最高,随着送丝速度增加,焊缝质量几

乎成线性大幅下降;焊缝成形质量随焊接速度变化不明显,在焊接速度达到 26 cm/min 时焊缝成形质量最佳;弧长修正对焊缝成形质量影响较为随机,在弧长修正指标为 8%时达到最高。

信噪比图与均值主效应图显示结果基本一致,可以得出最佳焊缝成形的工艺参数为:送丝速度 4.4 m/min、焊接速度 26 cm/min、弧长修正 8%。

表 4 为信噪比响应表,表中排序表示了送丝速度、焊接速度和弧长修正对焊缝成形质量影响的主次顺序,均值响应表(表 5)表示了以上 3 个因素对焊缝成形影响程度的主次排序。

表 4 信噪比响应表
Tab.4 Signal-to-noise ratio response table

水平	送丝速度/(m·min ⁻¹)	焊接速度/(cm·min ⁻¹)	弧长修正(%)
1	20.54	16.18	16.51
2	21.99	19.36	18.52
3	17.30	17.02	15.58
4	15.72	17.37	22.16
5	13.27	18.88	16.03
变化量	8.72	3.18	6.59
排序	1	3	2

表 5 均值响应表
Tab.5 Mean response table

水平	送丝速度/(m·min ⁻¹)	焊接速度/(cm·min ⁻¹)	弧长修正(%)
1	11.6	8.6	7.8
2	13.0	9.8	8.6
3	7.8	8.2	7.2
4	6.6	10.0	13.2
5	6.8	9.2	9.0
变化量	6.4	1.8	6.0
排序	1	3	2

根据信噪比响应表和均值响应表数据可知,影响焊缝成形质量的主次排序依次为送丝速度、焊接速度、弧长修正;对焊缝成形质量影响程度主次排序依次为送丝速度、焊接速度、弧长修正。两者排序相同。由以上结果可得:在 Tandem 双丝共熔池平焊实验中,送丝速度对焊缝成形质量影响最大,弧长修正次之,最后是焊接速度。因此,为获得更好的焊缝成形质量,送丝速度的选择非常重要,在该实验中,送丝速度为 4.4 m/min 时焊缝成形质量良好。

各参数交互作用矩阵如图 6 所示。图 6 中横坐标展示了各参数的数值段,纵坐标则表示了焊缝成形质量评分。根据图 6 可看出送丝速度、焊接速度与弧长修正两两之间的相互作用,以及在交互作用下焊接试样的焊缝成形质量评分高低。当送丝速度从

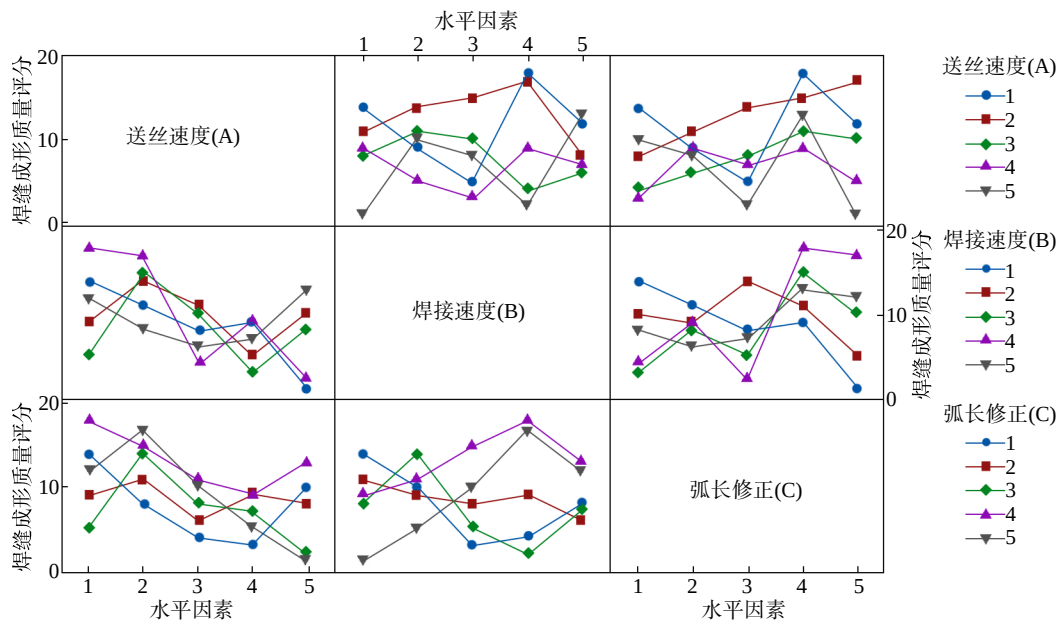


图6 各参数交互作用矩阵
Fig.6 Interaction matrix for each parameters

4.4m/min 增长为 4.6m/min、弧长修正在 2%~6%时对送丝速度的影交互作用几乎为零,在图中显示为 3 组类平行线,此时选择 4.4m/min 的送丝速度可获得更好的焊缝质量;当焊接速度为 30~32m/min 时,弧长修正和送丝速度交互作用较为明显,选择 30 cm/min 的焊接速度和 2%的弧长修正可获得更好的焊缝质量;弧长修正在 6%~8%时,焊接速度与其交互作用显著,焊接速度的微小变化就能引起焊缝成形质量的大幅变化,当焊接速度为 30 cm/min、弧长修正为 8%时可获得最佳焊缝成形。依据各参数交互作用图可对后期实验选择最优焊缝成形质量提供参考。

2.2 焊缝熔深、熔宽的影响因素分析

焊缝熔深、熔宽的信噪比分别如图 7 和图 8 所示。从图 7 中可以明显看出,随着 3 个参数分别增加,焊缝熔深均有先降低后升高的趋势。其中,送丝速度在 4.4m/min 时,熔深和熔宽最小。而在图 8 中,焊接速度由 24 cm/min 增加到 32 cm/min,熔宽有明显的减小趋势,分析认为随着焊接速度的增加,单位长度焊道的电弧能量开始逐渐减小,焊缝熔宽就会随之减小。弧长修正逐渐增加,在达到 6%时熔深最小,越过拐点,熔深增大。从熔深及熔宽的信噪比排序见表 6、7,可看出,送丝速度对焊缝熔深、熔宽的影响变化最为明显,送丝速度从 4.2 m/min 变化到 4.8 m/min 时,焊缝熔深和熔宽都先降至最低,后又升高。分析认为:Tandem 双丝焊接过程使用的是前后两根焊丝进行焊接,通过前丝的熔池高温熔化后

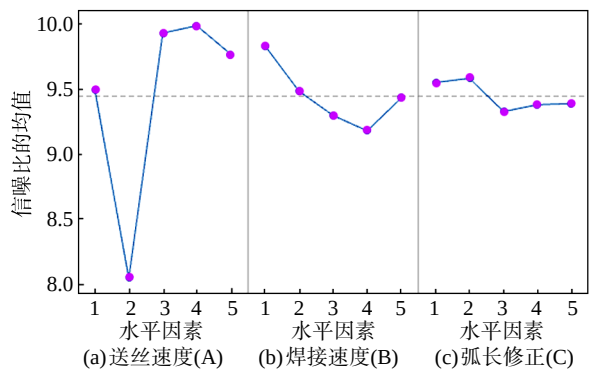


图7 熔深信噪比图

Fig.7 Melt depth signal-to-noise ratio plot

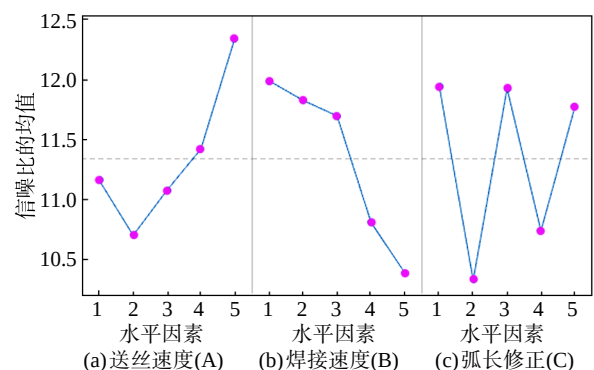


图8 熔宽信噪比图

Fig.8 Fused-width signal-to-noise ratio plot

丝。在这个过程中当其他因素保持不变时,送丝速度的快慢会影响焊缝处的熔覆率,从而影响熔深和熔宽,进而影响焊缝成形质量。在实际焊接施工中,过大或过小的焊缝熔深和熔宽对焊接件都会产生不好的影响,过大的熔深会造成焊接件在冷却时因收缩

表 6 熔深信噪比响应表

Tab.6 Melt depth signal-to-noise ratio response table

水平	送丝速度 /($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	焊接速度 /($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	弧长修正(%)
1	9.498	9.839	9.553
2	8.042	9.486	9.586
3	9.935	9.298	9.328
4	9.992	9.179	9.382
5	9.772	9.436	9.390
变化量	1.950	0.659	0.257
排序	1	2	3

表 7 熔宽信噪比表

Tab.7 Melt width signal-to-noise ratio table

水平	送丝速度 /($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	焊接速度 /($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	弧长修正(%)
1	11.16	11.99	11.94
2	10.7	11.83	10.32
3	11.08	11.70	11.92
4	11.42	10.80	10.74
5	12.34	10.38	11.77
变化量	1.65	1.61	1.62
排序	1	3	2

产生材料的内部应力,从而导致焊接件的变形和裂纹;熔深过浅会造成焊接处强度不够等问题。因此根据合理调整送丝速度以及其他焊接因素,得到良好的焊缝成形质量。

2.3 焊缝侧壁熔深、焊趾角的影响因素分析

在 Minitab 软件中分析回归方程拟合优度问题,一般采用残差图表示。正态概率图用于检测数据是否满足正态分布;残差直方图可用于观测数据是

否偏斜或异常;在焊缝成形的质量评定中,高的焊趾角以及良好的侧壁熔深是获得优良焊缝的重要因素。适当增加侧壁熔深,可以增加焊缝表面下凹量,避免指状熔深的出现。图 9 为侧壁熔深残差图。可看出,各点分布成一条直线,说明不同焊接工艺参数相互配合,侧壁熔深符合正态分布。图 10 为 Corner angle 残差图。由图 10 拟合值可看出,侧壁熔深在 $0.6 \sim 0.8 \text{ mm}$,标准化残差值在 0 附近,焊缝成形较为稳定,而当侧壁熔深小于 0.6 mm 时,标准化残差值较大,易出现畸变现象,分析认为,侧壁熔深过小是因为电弧对侧壁热输入不够而引起的侧壁熔合不良,在实际焊接过程中应避免此处的工艺参数组合。

Corner angle 是焊趾角的补角,焊趾处易形成应力腐蚀裂纹,对接接头的应力集中主要是焊缝余高引起的,对接接头的焊缝,其焊趾处的应力最大,较高的焊趾角,可以减少应力集中,延长焊缝的使用寿命。在本文中,通过探索更小的 corner angle 来获得更大的焊趾角。探求焊接参数对焊趾角的影响。由图 10 可看出,所有点分布基本成一条直线,成正态分布;残差拟合值图中的点基本均匀分布在零值两侧,无明显喇叭口趋势出现,当 Corner angle 在 $30^\circ \sim 38^\circ$ 时,标准化残差值较小,不易出现畸变现象,焊趾角较大,能较好的减小焊趾处的应力集中。

3 实验验证

根据以上实验中工艺参数(送丝速度、焊接速度、

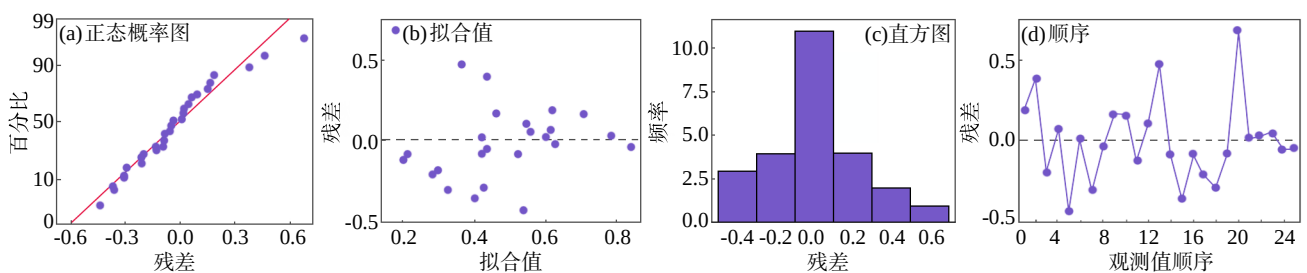


图 9 侧壁熔深残差图

Fig.9 Residual map of sidewall melt depth

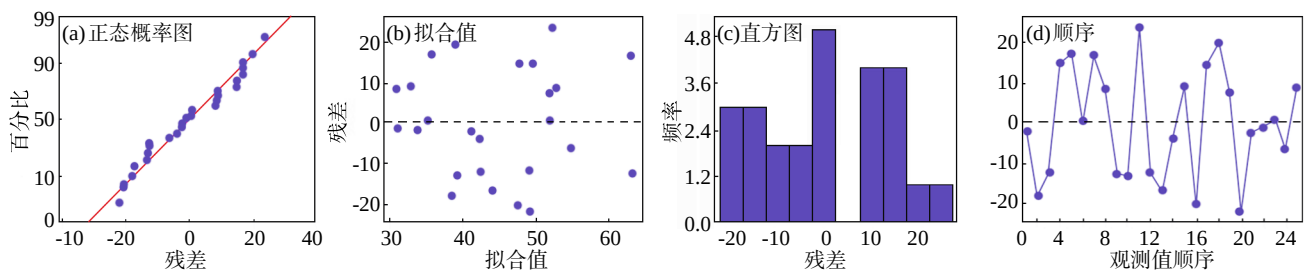


图 10 Corner angle 残差图

Fig.10 Residual plot of Corner angle

弧长修正)对焊缝成形质量的影响,选用送丝速度 4.4 m/min,焊接速度 26 cm/min,弧长修正 8%,干伸长 10 mm,将 Tandem 双丝焊枪安装于焊接小车上,将实验板材放置在全位置变位机上,调整好平焊位置所需角度,焊接过程实时调整焊接机器人,使焊丝始终对准焊缝中心位置,上位机控制焊接小车沿直导轨由左至右行走,最终得到焊缝表面成形形貌如图 11 所示。可以看出焊缝成形质量良好,焊缝表面光洁平整,未出现明显焊接缺陷。通过对焊缝横切面进行研磨,焊缝的宏观截面形貌如图 12 所示。



图 11 焊缝表面成形形貌

Fig.11 Formed morphology of weld seam surface

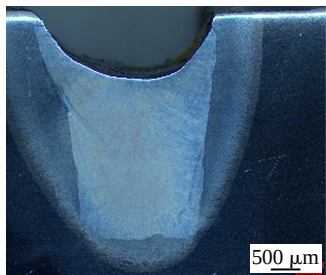


图 12 焊缝的宏观截面金相

Fig.12 Macroscopic morphology of cross-section of weld seam

从图 11 和图 12 可看出:焊缝整体成形良好,未见气孔夹渣、未焊透、未融合等缺陷,corner angle(焊趾角补角)较小,焊缝上表面略有下凹,与母材表面融合良好,侧壁熔深较为均匀,熔深、熔宽适中。焊接过程中,由于前后两根焊丝同时起弧,在较高的熔池温度下也加快了焊丝的熔化,提升了焊丝的熔覆效率;同时两根焊丝填充焊缝,对熔池有一定的冷却效果。从焊缝宏观组织图看出,有明显的熔合线,表明热输入充分;焊缝与母材结合界面较清晰,说明焊接工艺稳定,无明显未熔合缺陷。焊缝左侧和右侧略有不对称,分析认为是焊接过程中焊枪位置与焊缝中心出现了微小偏差,以及双热源可能导致热影响区对称性变化;焊缝底部热影响区大致成凹坑状,分析认为是在平焊位置由于熔滴重力的影响较大,且底部散热较慢所形成。总体来看,采用 Tandem 双丝焊接方式进行焊接,整体单道焊缝填充量也远大于单丝单道焊接。

4 结论

(1) 对 Tandem 双丝共熔池平焊焊接进行工艺

实验,建立正交实验模型,运用田口方法做数据分析,结果表明,最佳参数组合为送丝速度 $v_f=4.4$ m/min、焊接速度 $v_w=26$ cm/min、弧长修正 $\eta=8\%$ 、干伸长 $D=16$ mm、焊丝夹角 $\alpha=30^\circ$,送丝速度对焊缝成形和熔深、熔宽影响最大,焊接速度对焊缝成形和熔宽影响最小,弧长修正对熔深的影响最小。侧壁熔深在 0~0.6 mm 之间,焊趾角的补角大于 38° 时容易发生畸变。

(2) 根据焊缝成形评分交互作用图,分析了送丝速度、焊接速度和弧长修正三者间的相互作用对焊缝成形的影响,当送丝速度从 4.4 m/min 增长为 4.6 m/min、弧长修正在 2%~6%时,二者交互作用甚微,此时改变焊接速度可有效改善焊缝成形质量;弧长修正在 6%~8%时,焊接速度与其交互作用显著,可通过细微调整焊接速度而得到更好的焊缝成形质量。

(3) 采用最佳工艺参数组合开展工艺实验,观察焊缝表面形貌,结果表明焊道表面成型一致性好,焊缝饱满均匀,焊趾处过渡平滑,焊缝深宽比适中,满足实际应用中的焊缝要求,无未焊透、未熔合等缺陷;观察焊缝截面宏观组织形貌,焊缝内部无明显缺陷,从而验证了田口方法正交模型的准确性。

参考文献:

- [1] 钟蒲,李亮玉,任国春,等. Tri-Arc 双丝焊“T”形电弧及其促进方法[J]. 焊接学报,2024,45(2):54-60.
- [2] 陶星空,杨环宇,巴现礼,等. 中厚板脉冲双丝高速打底焊自由成形及稳定性分析[J]. 焊接学报,2023,44(5):14-19.
- [3] 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.
- [4] 赵博,范成磊,杨春利,等. 双丝窄间隙焊接工艺参数对焊缝成形的影响[J]. 焊接学报,2008,29(6):81-84.
- [5] 范成磊,孙清洁,赵博,等. 双丝窄间隙熔化极气体保护焊的焊接稳定性[J]. 机械工程学报,2009,45(7):265-269.
- [6] 张锋,王长江,赵勇强,等. 油气管道全位置单枪双丝自动焊接技术[J]. 焊接学报,2014,35(7):72-74.
- [7] 杨东青,谢高齐,郭顺,等. 排列角度对高氮钢双丝 GMAW 熔滴过渡行为及成形特性的影响 [J]. 机械工程学报,2024,60(16):171-179.
- [8] 吴东亭. 旁路耦合双丝间接电弧焊工艺及堆焊层性能研究 [D]. 济南:山东大学,2021.
- [9] 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. 