

引用格式:罗雨,苏佳毅,任飞燕,等.基于旋转电弧的窄坡口管道焊接平焊位置打底工艺研究[J].热加工工艺,2025,54(18):188-192

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20232901
<http://www.rjggy.net> rjggy@vip.163.com

基于旋转电弧的窄坡口管道焊接平焊位置 打底工艺研究

罗雨, 苏佳毅, 任飞燕, 田文鹏, 钱学芝, 贾玉麟, 冯艳, 黄子祥

(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:针对管道全位置焊接中平焊位置焊接打底层存在焊穿、未焊透及未熔合问题,提出了基于旋转电弧的窄坡口平焊位置焊接工艺方法。以 X65 管线钢板材对接窄坡口为试验对象,基于 Minitab 的田口方法,建立正交试验模型,探究基于旋转电弧 STT 平焊打底焊接方案下,不同工艺参数组合对焊缝成形的影响规律。结果表明,焊接工艺参数取送丝速度为 6.2 m/min、焊接速度 26 cm/min、旋转速度 1200 r/min 时,旋转电弧 STT 平焊打底单面焊双面成型一致性好,未出现焊接缺陷,这为管道全位置焊接平焊位置基本工艺规范的制定奠定基础。

关键词:平焊位置;旋转电弧焊;窄坡口;打底工艺;田口方法

中图分类号: TG444⁺.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2025)18-0188-05

Study on Bottoming Process of Narrow Bevel Pipe Welding in Flat Welding Position Based on Rotating Arc

LUO Yu, SU Jiayi, REN Feiyan, TIAN Wenpeng, QIAN Xuezhi,

JIA Yulin, FENG Yan, HUANG Zixiang

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

Abstract: Aiming at the problems of weld-through, undercutting and unfused welding of the bottoming layer in flat welding position in all-position welding of pipelines, a narrow bevel flat welding position welding process method based on rotating arc was proposed. Taking X65 pipeline steel plate butt narrow bevel as the test object, based on Minitab's Taguchi method, an orthogonal test model was established to investigate the influence of different combinations of process parameters on weld shaping under the rotating arc STT flat welding bottoming welding program. The results show that when the welding process parameters are the wire feeding speed of 6.2 m/min, welding speed of 26 cm/min, rotating speed of 1200 r/min, the rotating arc STT flat welding bottoming single-sided welding double-sided molding consistency is good, there are no welding defects, which can lay a foundation for the development of the basic process specification for the pipeline all-position welding flat welding position

Key words: flat welding position; rotary arc welding; narrow bevel; bottoming process; taguchi method

管道铺设时多采用全位置焊接法,将管道水平铺设在地面上,常采用 MAG 焊进行全位置焊接,采用 STT 打底,实现单面焊双面成型。在管道焊接中,打底是最重要的一步,其焊接质量直接影响到后续的填充和盖面。相比传统焊接,旋转电弧焊降低了热

输入,使焊缝两侧的金属充分受热,增加了热源移动速度,避免高热输入导致的工件变形、开裂。减小热输入,使熔池冷却周期变短,改善焊缝的成型质量,溶渣与熔融金属不易流失,能促进熔滴过渡,改善侧壁未熔等缺陷。针对全位置焊接平焊位置焊接面产生焊缝咬边、烧穿、无法充分焊透及未熔合等缺陷,提出基于旋转电弧平焊打底方法。采用窄坡口焊接,通过减少焊丝的填充量,达到提高焊接效率,减少焊接热输入的目的。平焊是一种高效的焊接方式,生产效率,且焊接质量稳定。徐望辉^[1]对旋转电弧窄间

收稿日期:2023-10-27 修回日期:2025-06-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51305037,52175286)

作者简介:罗雨,男,副教授,博士,研究方向:机械人技术及智能装备;

E-mail:luoyu@bipt.edu.cn

通讯作者:苏佳毅,男,硕士研究生,主要从事焊接装备自动化与智能化研究;E-mail:17808042875@163.com

窄坡口 MAG 焊研究发现, 旋转电弧窄坡口焊接技术通过电弧旋转扩大电弧加热区域、增大电弧对侧壁的加热时间来保证侧壁完全熔合。冯靖等^[2]对管道全位置 STT 打底工艺做了分析, 提出分段焊接方法, 根据不同的焊接位置, 在全自动焊机上设置不同的焊接参数, 合理的应对了熔池受力流淌等问题。罗雨等^[3]对 X65 管线钢窄坡口旋转电弧焊接存在的侧壁未熔合等问题, 利用高速摄像机采集了熔滴过渡的过程。结果表明当旋转频率在 5~30Hz 范围内时能获得良好的焊缝成形。在旋转电弧的高频搅拌作用下所获得的焊缝表面纹路十分致密, 且焊接接头具有良好的抗拉伸性能和抗弯性能。毛志伟等^[4]采用田口方法, 建立了正交试验模型, 研究旋转电弧的工艺参数组合对角焊缝质量影响程度, 得到了优化后的焊接参数, 经试验可获得良好的角焊缝。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。汤泉等^[6]对旋转电弧产生的飞溅做了分析, 提出了一种基于掩膜的多值与神经网络组合方法识别焊接飞溅。结果表明: 对于具有灰度分布范围大、背景复杂的旋转电弧飞溅图像该组合方法的识别准确率可达 95.76%。高延峰等^[7]对 MAG 焊焊缝成形做了平板堆过验, 研究了焊接电流对焊缝成形的影响。结果表明: 焊接电流增大, 熔宽明显增加, 熔深和余高也自所增加。焊接电压增大, 熔深和熔宽均有所增加, 余高减小, 熔敷速度几乎保持不变, 余高系数增大, 焊缝成形系数先不变后减小。赵博^[8]对窄间隙 MAG 焊双丝方法存在的两个电弧间的干扰、电弧稳定性差这一问题做了研究, 分析了断弧的发生过程及电信号变化规律。结果表明: 电弧断弧的机制是电弧间电磁力和熔池波动共同作用的结果。

目前, 在焊接领域中还未见有学者使用田口方法, 研究旋转电弧窄坡口平焊 STT 打底焊接工艺。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, 探究窄坡口平焊 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 试验材料及方法

1.1 试验材料

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 600mm×52mm×29mm。焊丝选用 $\phi 1.0\text{mm}$ 的 ER80S-G 型号实心气体保护焊丝。进行打底层工艺参数的初步摸索, 将两块长板一侧铣出坡口, 钝边厚度 $(2\pm 0.2)\text{mm}$, 焊丝干伸长 $D=10\text{mm}$, 组对间隙 2mm, 如图 1 所示进行对接焊试验。X65 级高强度钢和 ER80S-G 焊丝的化学成分见表 2。

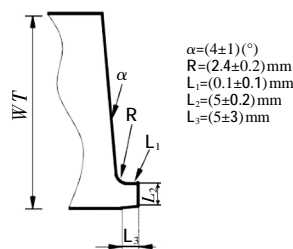


图 1 J 型窄坡口

Fig.1 J-type narrow bevel

表 1 X65 高强度钢及 ER80S-G 焊丝化学成分(质量分数, %)
Tab.1 Chemical composition of X65 high-strength steel and ER80S-G welding wire (wt%)

材料	C	Mn	P	Cu	S	Si	Ni	Mo	Cr	Fe
X65	0.09	1.60	0.002	0.30	0.004	0.35	0.30	0.30	0.25	余量
ER80S-G	0.04	1.95	0.007	0.23	0.01	-	-	0.32	-	余量

1.2 焊接设备

采用全数字化 MAG-350RPL 型焊接电源, 该型号的焊接电源, 除了具备能满足打底试验要求的 STT 功能外, 还具有低飞溅、单脉冲、双脉冲、恒压等 4 种焊接模式的不停弧切换功能。低飞溅和脉冲的完美结合, 使电弧更稳定柔和, 熔池更平静, 焊缝更美观。

在前期的打底焊接工艺参数摸索阶段, 需要用到 1 种如图 2 所示的全位置变位机, 来模拟 1G 平焊位置的焊接过程。该变位机可实现 $0^\circ\sim 180^\circ$ 之间每 15° 间隔的随意转换, 通过改变丝杠卡销的位置, 来实现管道全位置自动焊接过程的模拟。

1.3 焊接试验方法

采用全数字化 MAG-350RPL 型焊接电源, 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坡口平焊 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^[9]。



图2 基于旋转电弧的STT平焊打底试验平台

Fig.2 STT flat welding base test platform based on rotating arc

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 3 因素 5 水平正交试验表,具体焊接工艺参数组合见表 2。

表 2 具体焊接工艺参数组合

Tab.2 Combination of specific welding process parameters

工艺编号	送丝速度 A $v_f/(m \cdot \min^{-1})$	焊接速度 B $v_w/(m \cdot \min^{-1})$	旋转速度 C $n/(r \cdot \min^{-1})$	焊缝成形评分 F(0~20)	焊缝成形评分
1	5.8	24	300	12	3
2	5.8	26	600	14	8
3	5.8	28	900	10	10
4	5.8	30	1200	2	9
5	5.8	32	1500	1	7
6	5.9	24	600	15	4
7	5.9	26	900	11	6
8	5.9	28	1200	13	11
9	5.9	30	1500	3	7
10	5.9	32	300	4	2
11	6.0	24	900	17	10
12	6.0	26	1200	8	11
13	6.0	28	1500	5	11
14	6.0	30	300	13	5
15	6.0	32	600	16	7
16	6.1	24	1200	12	16
17	6.1	26	1500	14	14
18	6.1	28	300	10	4
19	6.1	30	600	16	8
20	6.1	32	900	14	17
21	6.2	24	1500	13	10
22	6.2	26	300	14	7
23	6.2	28	600	7	9
24	6.2	30	900	11	15
25	6.2	32	1200	3	16

按照表 2 所示的 3 因素 5 水平混合参数,进行 J 型坡口 1G 位置的平板对接焊接试验,以探究基于旋转电弧 STT 打底工艺的可焊参数范围。

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 SNR 作为衡量焊缝质量的评价指标^[4]。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,在交互作用图中,曲线之间相互平行则表示没有发生交互作用,反之,曲线交叉这表示发生了交互作用。分析信噪比响应表,可以得出焊接速度、送丝速度和旋转速度对焊缝成形的影响。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。依据数据对焊后焊缝成形评分,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。

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

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因素,曲线斜率越大影响越明显。图 3 表示送丝速度 A、焊接速度 B、旋转速度 C 这 3 因素在相互作用下焊缝成形的主效应图。旋转速度和送丝速度的增加,对焊缝成形的影响明显,在送丝速度达到 6.2 m/min,旋转速度达到 1200 r/min,焊缝成形最好。焊接速度在 26 cm/min 最合适,此后焊接速度增加,焊缝成形质量始终降低。信噪比与均值主效应图的分析结果基本一致,则最优的一组焊接工艺参数组合是: $v_f=6.2$ m/min、 $v_w=26$ cm/min、 $n=1200$ r/min。响应表排序顺序,表示各因素对焊缝成形的影响大小。如表 3 所示,从信噪比响应表和均值响应表可以看出对焊缝影响最大的是旋转速度,其次是送丝速度,最后是焊接速度。信噪比响应表和均值响应表结论完全一致。根据田口方法的重要因子判定原则,分析认为:旋转速度对优化各参数组合下的焊缝成形效果

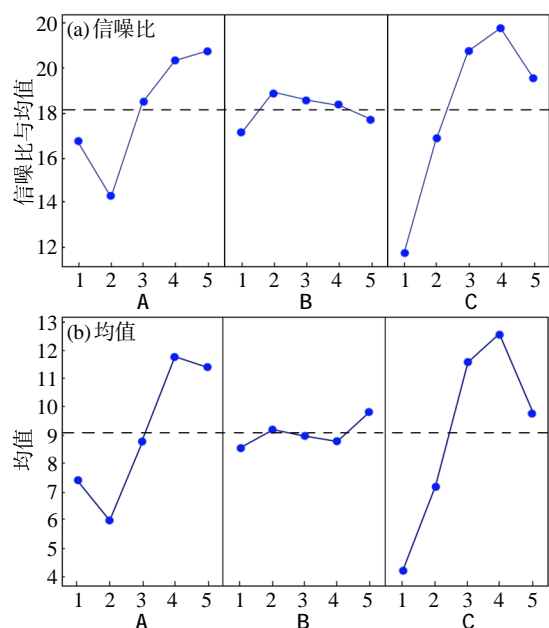


图3 焊缝成形响应下的信噪比与均值主效应图
Fig.3 Main effect charts of signal to noise ratio and mean value under weld forming response

表3 信噪比和均值响应表

Tab.3 The signal to noise ratio and mean response tables

(a)信噪比响应表				(b)均值响应表			
水平	A	B	C	水平	A	B	C
1	16.72	17.13	11.70	1	7.400	8.600	4.200
2	14.27	18.86	16.83	2	6.000	9.200	7.200
3	18.51	18.56	20.74	3	8.800	9.000	11.600
4	20.34	18.31	21.78	4	11.800	8.800	12.600
5	20.72	17.70	19.51	5	11.400	9.800	9.800
极差	6.45	1.72	10.08	极差	5.800	1.200	8.400
排序	2	3	1	排序	2	3	1

明显,送丝速度能减小各参数之间对焊缝成形影响的差异,焊接速度对焊缝成形影响最小。

2.2 因素间的交互作用

根据交互作用图,分析当某一因素变化时,其余因素与该因素的交互作用,若曲线平行则交互作用弱,反之交互作用强。观察交互作用图曲线走势来判断各因素对焊缝成形的影响,其中当某一因素取值确定后,可以根据交互作用图得到另外两因素的最优取值使得在此取值条件下焊缝成形效果最好,为旋转电弧窄坡口平焊位置的工艺规范制定提供参考价值。

焊接速度、送丝速度和旋转速度之间的交互作用如图4所示,交互作用图中横轴代表水平值,纵轴表示焊缝成形评分。水平实际值见表4。当旋转速度由300r/min增加到600r/min时,焊接速度与旋转速度变化趋势一致、相互平行,送丝速度选取5.8~6.2中的任意值,都对焊缝成形的评分作用增强,即焊缝成形质量更好。当焊接速度为26~28cm/min时,焊接速度与送丝速度交互作用强,曲线相互交叉、平行度低,此时选取送丝速度6.0m/min、旋转速度1500r/min为最优工艺参数组合。焊接速度为30~32cm/min时,选取送丝速度6.1m/min,旋转速度为900r/min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,为旋转电弧窄坡口平焊STT打底层焊接提供依据。

3 工艺试验结果

根据上述分析得到的最优参数组合,开展工艺

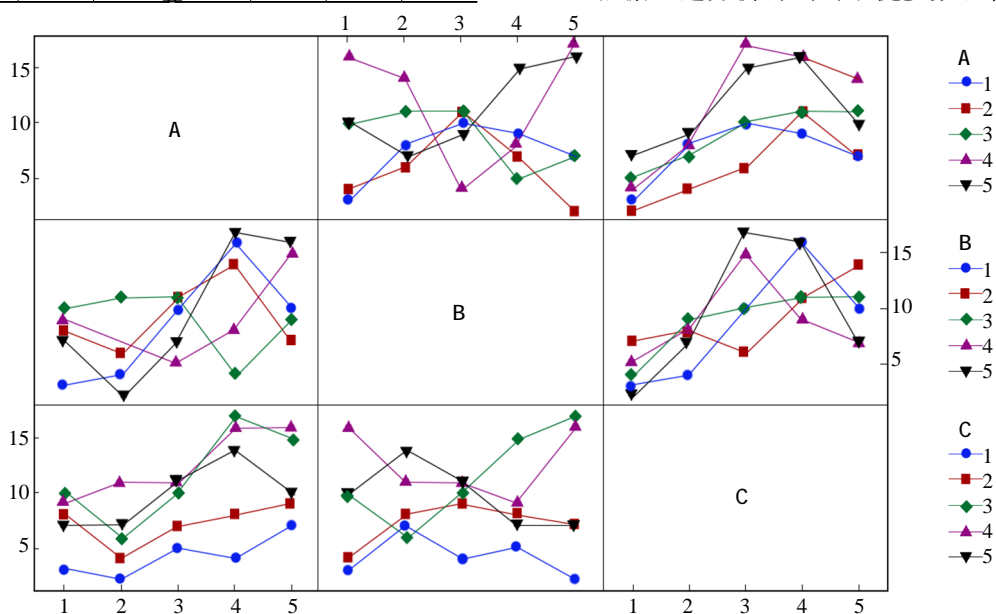


图4 焊缝成形响应与各因子间的交互作用图

Fig.4 Interaction diagram of weld forming response and various factors

表4 水平值和水平实际值对应表
Tab.4 Corresponding table of horizontal values and level actual values

水平	送丝速度 A $v_f/(m \cdot \min^{-1})$	焊接速度 B $v_w/(cm \cdot \min^{-1})$	旋转速度 C $n/(r \cdot \min^{-1})$
1	5.8	24	300
2	5.9	26	600
3	6.0	28	900
4	6.1	30	1200
5	6.2	32	1500

试验,焊接工艺参数取 $v_f=6.2\text{m}/\text{min}$ 、 $v_w=26\text{cm}/\text{min}$ 、 $n=1200\text{r}/\text{min}$ 。坡口组对的错边量控制在 0.5mm 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,试验结果如图 5(a)、(b)所示。取垂直于焊接方向的截面作为金相观察面,观察平焊接头宏观组织形貌,如图 5(c)所示。在焊接过程中,飞溅少,且电弧稳定,焊完后焊缝外观成形较好,熔合线附近过渡平稳,外观上未出现焊接缺陷。

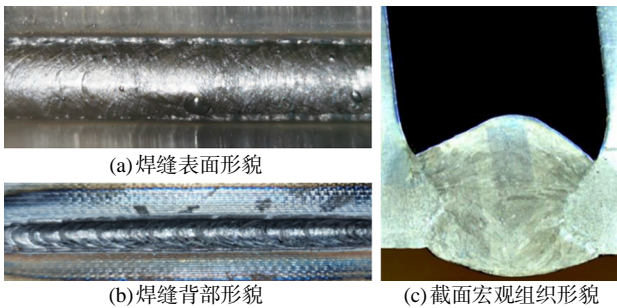


图5 平板对接焊缝形貌

Fig.5 The morphologies of the plate butt weld

从图 5(a)、(b)可知,打底焊表面成型和背部成型一致性好,焊缝表面成形连续且饱满,无气孔、未焊透、未熔合等缺陷。试样腐蚀后区域分界明显,焊缝接头表现出对称性,焊缝截面为“酒杯状”,如图 5(c)所示。旋转电弧起弧的瞬间,形成高温熔池,随着热输入量增加,金属熔化量增加,熔池受到重力的影响,会产生下坠现象,导致焊道上部熔宽变窄,中部熔宽变宽。此时焊接速度快、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,导致焊道下部熔宽变窄。平焊位置,焊缝中心线两侧对称,形状饱满,符合预期效果,从而验证了理论分析的正确性。

4 结论

(1) 利用田口方法,对旋转电弧窄坡口平焊 STT

打底工艺进行了研究,建立正交试验模型并进行焊接试验,结果表明最佳参数组合为 $v_f=6.2\text{m}/\text{min}$ 、 $v_w=26\text{cm}/\text{min}$ 、 $n=1200\text{r}/\text{min}$ 。信噪比响应表中旋转速度极差系数为 10.08,送丝速度的为 6.45,焊接速度的为 1.72,对比得出各因素对焊缝成形影响的权重为旋转速度 > 送丝速度 > 焊接速度;均值响应表中旋转速度极差系数为 8.4,送丝速度的为 5.8,焊接速度的为 1.2,对比得出各因素对焊缝成形影响的权重为旋转速度 > 送丝速度 > 焊接速度。信噪比响应和均值响应结果一致。

(2) 观察交互作用图发现,送丝速度与旋转速度走势一致,图 4 中曲线接近平行,表明两者之间交互作用弱;送丝速度与焊接速度交叉明显,表明两者交互作用强;焊接速度与旋转速度交叉明显,表明两者交互作用强。观察交互作用图曲线走势来判断各因素对焊缝成形的影响,为旋转电弧窄坡口平焊位置的工艺规范制定提供参考价值。

(3) 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,焊缝饱满均匀、无明显焊接缺陷。观察焊缝表面形貌,可以看出焊缝连续均匀,飞溅小且焊接过程稳定;观察截面宏观组织形貌,可见焊缝内部无明显的缺陷,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。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] 徐望辉. 空间多位置摆动电弧窄间隙 MAG 焊熔滴过渡与焊缝成形研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [2] 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.
- [3] 罗雨,吉天亮,高萌萌,等. X65 管线钢窄坡口旋转电弧焊接工艺与性能[J]. 焊接,2023(7):26-33.
- [4] 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.
- [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.
- [6] 汤泉,石志新,毛志伟. 基于多阈值与神经网络的旋转电弧图像飞溅分析[J]. 焊接学报,2022(12):41-46.
- [7] 高延峰,黄志冰,刘彬彬,等. 焊接参数对旋转电弧 MAG 焊缝成形的影响[J]. 热加工工艺,2015,44(11):59-63.
- [8] 赵博. 窄间隙 MAG 焊电弧行为研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [9] 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.