

引用格式:钱学芝, 罗雨, 冯艳, 等. 输氢管道窄坡口 TIG 自动焊平焊位置打底工艺研究[J]. 热加工工艺, 2026, 55(11):30-38+46. QIAN Xuezhi, LUO Yu, FENG Yan, et al. Research on Root Pass Welding Process of Flat Welding Position for Hydrogen Pipeline Narrow Bevel TIG Automatic Welding[J]. Hot Working Technology, 2026, 55(11):30-38+46. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.25080018

输氢管道窄坡口 TIG 自动焊平焊位置 打底工艺研究

钱学芝, 罗雨, 冯艳, 黄子祥, 王东栋, 左梦奎, 田文鹏, 贾玉麟

(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:采用 TIG 自动焊打底是提升输氢管道铺设效率的有效技术手段之一。针对输氢管道的特殊工艺要求,搭建了自动焊接试验平台,采用 TIG 自动焊打底方法,对 X52 管线钢材的平焊位置进行窄坡口焊接试验研究。基于单因素法和响应曲面法,研究了送丝速度、焊接速度和焊接电流参数对焊缝成形的影响规律。结果表明,在满足对口精度要求的条件下,当送丝速度为 6.5 m/min、焊接速度为 13 cm/min 及焊接电流为 145 A 时,打底层焊道成形美观,一致性好,无未熔合、未焊透等明显缺陷。各参数对焊缝成形的影响具体表现为,增大送丝速度能使打底层厚增加,熔深增大;增大焊接速度,线能量减小,易出现侧壁熔合不均匀、未焊透现象,影响背部焊缝成形;焊接电流增大,一定程度上促进单面焊双面成形,但电流过大容易造成熔滴下坠甚至焊穿等缺陷。

关键词:输氢管道;TIG 自动焊接;打底焊;平焊位置;窄坡口

中图分类号: TG444+.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2026)11-0030-09

Research on Root Pass Welding Process of Flat Welding Position for Hydrogen Pipeline Narrow Bevel TIG Automatic Welding

QIAN Xuezhi, LUO Yu, FENG Yan, HUANG Zixiang, WANG Dongdong, ZUO Mengkui,
TIAN Wenpeng, JIA Yulin

(Beijing Higher Education Engineering Research Center for Advanced Connection Technology in Energy Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: The use of TIG automatic welding for root pass welding is one of the effective technical means to improve the efficiency of hydrogen pipeline laying. In response to the special process requirements for hydrogen pipelines, an automatic welding test platform was established. Using TIG automatic welding for the root pass welding, narrow bevel welding tests were conducted on X52 pipeline steel in flat welding position. Based on the single-factor method and the response surface method, the influence law of wire feeding speed, welding speed and welding current on the weld seam forming was investigated. The results show that, under conditions that meet the matching accuracy requirements, when the wire feeding speed is 6.5 m/min, the welding speed is 13 cm/min, and the welding current is 145 A, the root pass weld bead is aesthetically pleasing, consistent, and free of obvious defects such as incomplete fusion or lack of penetration. The specific effects of these parameters on the weld formation are as follows: increasing the wire feed rate increases the thickness of the root pass and the penetration depth; increasing the welding speed reduces the heat input, which can lead to uneven fusion on the side walls and lack of penetration, thereby affecting the formation of the back-side weld; increasing the welding current promotes single-sided welding with double-sided formation to a certain extent, but excessive high current can cause defects such as droplet sagging or even burn-through.

Key words: hydrogen pipeline; TIG automatic welding; root pass welding; flat welding position; narrow bevel

氢能是一种清洁的二次能源,可作为高效的储能载体。发展氢能产业被认为是中国实现碳达峰、

碳中和国家战略的必经之路^[1-3]。为实现经济高效的氢气输送,采用长输管道是最为合适的方法之一^[4]。然而,氢气在常温常压下具有易燃易爆的特性。输氢管道内高速流动的氢气极易带动杂质并产生火花,严重危及管道输送安全。因此,输氢管道焊接首先要解决的是管材、焊材与氢气特性匹配的问题。氢脆敏感

收稿日期:2025-08-04

修回日期:2026-03-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51305037,52175286)

作者简介:钱学芝,男,硕士研究生,主要研究方向:主要从事焊接装备自动化与智能化;E-mail:1553601445@qq.com

性与材料强度、化学性能及微观组织等密切相关^[5]。目前,国内外输氢管道的打底焊接常采用人工氩弧焊工艺。相比于 STT(surface tension transfer,表面张力过渡)焊和 RMD(regulated metal deposition,短弧控制技术)焊,氩弧焊打底工艺不但能有效杜绝管道内部出现焊渣和飞溅颗粒,而且以纯氩气为保护气能有效抑制氢脆和氧化反应。STT 和 RMD 根焊工艺均是通过软件来控制 GMAW(gas metal arc welding,熔化极气体保护焊)熔滴过渡行为,不能从根本上解决焊渣和飞溅问题^[6]。CMT(cold metal transfer,冷金属过渡)焊接工艺不产生飞溅,极低的热输入能有效解决不锈钢板及铝板翘曲、回熔问题^[7]。人工氩弧焊接具有焊接变形小、适用性广泛等优点,但生产效率低、焊接质量不稳定、人工成本高,不符合当前自动化、智能化发展需求。陈家河^[8]采用双 TIG(tungsten inert gas,钨极惰性气体)自熔打底焊与双 MIG(metal inert gas,熔化极惰性气体)填充盖面焊组合方式,对多种坡口形式进行试验,研究工艺参数、线能量变化对焊缝成形的影响。雷青娟^[9]以两种不同规格油管用钢为试验对象,进行管段对接坡口 TIG 焊接试验,利用有限元法研究对接坡口的焊接热循环过程,建立热积累效应评价指标。Xu 等^[10]建立了 X80 管线钢环焊缝区的三维模型,考虑焊缝区结构不均匀性的影响,分析残余应力场和氢浓度场共同

作用下氢的扩散过程。结果表明:TIG 自动焊接工艺有利于增大焊缝熔深,减小熔宽,提高焊接质量,适用于压力容器的打底焊接。此外,其焊接特性非常契合输氢管道的焊接要求,提高了焊接接头处的气密性,并且抑制了氢脆现象。

目前,关于输氢管道 TIG 自动焊接工艺技术的研究很少,特别是打底焊接工艺更是缺少系统研究。输氢管道 TIG 焊接有焊接质量高、精度高、可自动化的优点,可满足焊接工艺需求。与传统油气管道相比,输氢管道的材料特性、焊接工艺要求以及安全性方面存在独特的挑战,需要更专业、系统的研究。在此背景下,开展输氢管道的 TIG 自动焊接打底工艺研究,为后续的焊接工作做好铺垫。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验母材为 X52 管线钢,管径为 $\phi 457\text{ mm}$,壁厚为 20.6 mm 。焊丝型号为 ER70S-G,直径为 $\phi 1.0\text{ mm}$ 。母材及焊丝的化学成分见表 1。考虑小角度坡口可使钨针插入到坡口底部,具有提高焊缝熔深、熔宽的效果;同时,小钝边厚度配合小热输入的 TIG 焊接工艺可以减少液态熔池停留时间,有利于打底层焊道单面焊双面成形^[7],试验样品开 U 型坡口,坡口角度 5° ,坡口底部半径 3 mm ,根部间隙 1 mm ,钝

表 1 X52 钢和 ER70S-G 焊丝的化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of X52 steel and ER70S-G welding wire (wt%)

材料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Ti	Fe
X52 钢	0.182	0.222	1.137	0.019	0.01	0.018	0.042	0.001	0.009	0.036	-	余量
ER70S-G	0.055	0.850	1.500	0.013	0.01	0.020	0.030	0.010	0.020	-	0.18	余量

边厚度 2.5 mm ,钝边伸出长度 1.5 mm ,如图 1 所示。

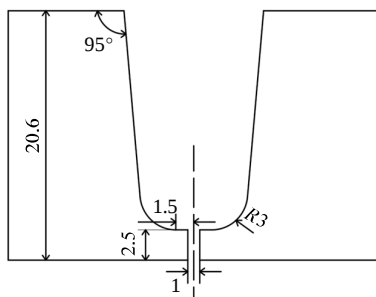


图 1 坡口尺寸(mm)
Fig.1 Bevel sizes (mm)

1.2 试验设备

输氢管道用 TIG 焊接设备和焊枪如图 2 所示。采用 YC-400TX4 型直流脉冲 TIG 焊接电源,其具

有重复、点焊等多种焊接模式,脉冲频率调节范围广,支持多组焊接条件的存储和调用,采用全数字控制能精准调整焊接参数。使用定制的氩弧焊枪,专门针对此类窄坡口焊接。

1.3 试验方法

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^[11]。焊丝与焊缝中心线保持重合,通过上位机 PC 端控制焊接设备运行。针对平板打底层焊接试验,改变送丝速度、焊接速度和焊接电流进行单因素研究,分析各因素对焊缝成形、背部焊缝余高及焊道厚度的影响规律。以单因素法得到最佳参数组合,通过响应曲面法,基于 Design-Expert 软件对送丝速度、焊接速度和焊接电流进行

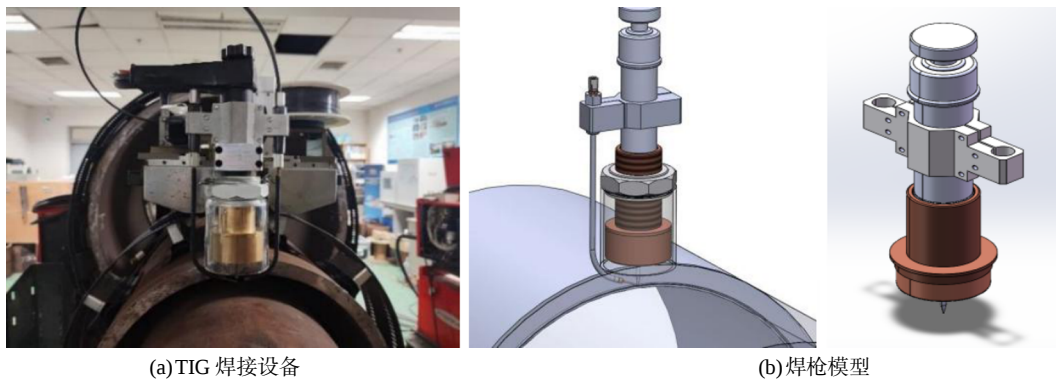


图 2 输氢管道用 TIG 焊接设备和焊枪

Fig.2 TIG welding equipment for hydrogen pipeline and welding torch

三因素五水平的 Box-Behnken Design 参数试验组合,通过试验得出基于 TIG 焊接方式的平焊打底层最优工艺参数组合。焊缝成形质量直接影响环焊接头的性能,为确保焊缝成形一致性良好、侧壁熔合均匀、美观,并满足国家焊缝检测质量使用等级的要求,将焊缝成形分为 4 个等级^[12],并设置不同等级焊缝成形的评价标准,如表 2 所示。具体焊接工艺参数组合见表 3,其中保护气为氩气。

表 2 焊缝成形质量等级划分
Tab.2 Grade division of weld forming quality

评价等级	评价标准	评分范围
I	一致性好,余高稳定,侧壁熔合好,无缺陷或极少焊接缺陷,且满足国标 1 级标准	16~20
II	一致性较好,余高稳定,侧壁熔合好,出现少量缺陷且满足国标 2 级标准	11~15
III	一致性差,侧壁熔合不均匀,余高起伏且存在部分缺陷,但满足国标 3 级标准	6~10
IV	成形不连续,侧壁熔合不均匀,余高起伏,缺陷较多且不满足国标标准	0~5

表 3 焊接工艺试验参数
Tab.3 Welding process test parameters

编号	送丝速度 v_f /($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	焊接速度 v_w /($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	焊接电流 I /A	背部焊缝余高 /mm	打底层厚 /mm	背部成形质量 评分	焊缝成形质量 评分
1 [#]	6.0	12	140	0.6	3.0	11	16
2 [#]	6.5	12	140	0.5	3.6	4	12
3 [#]	7.0	12	140	0.3	3.9	2	8
4 [#]	7.5	12	140	0.03	4.1	2	6
5 [#]	8.0	12	140	0.01	4.4	1	4
6 [#]	6.5	10	145	0.8	3.6	15	13
7 [#]	6.5	11	145	0.6	3.3	7	6
8 [#]	6.5	12	145	0.5	3.5	17	16
9 [#]	6.5	13	145	0.4	3.7	18	18
10 [#]	6.5	14	145	0.5	3.2	9	8
11 [#]	6.0	12	130	0.2	3.3	3	12
12 [#]	6.0	12	135	0.6	3.0	8	9
13 [#]	6.0	12	140	0.4	3.2	11	15
14 [#]	6.0	12	145	0.5	3.1	15	17
15 [#]	6.0	12	150	0.7	2.9	5	4

2 工艺参数对焊缝形貌的影响

焊接参数选择不当易出现各种缺陷^[13]。单因素控制法能很好地反映该因素变化对试验结果的影响,

通过单因素法得出符合焊接质量要求的工艺参数。为了更直观地判断单因素变量对焊缝成形的影响规律,对焊缝成形、背部焊缝余高和焊道厚度进行定量分析,并利用 Origin 软件绘制点线图。焊缝成

形图号对应表 2 的试验参数编号。

2.1 送丝速度对焊缝成形的影响

熔滴过渡行为随着送丝速度的变化而改变^[14],合理调节送丝速度能直接影响焊缝的成形和性能^[15]。图 3 为不同送丝速度下的焊缝形貌及形貌变化曲线。由图 3(a)可以看出,增大送丝速度,背部焊缝不连续甚至无法完全焊透,对焊缝熔深、熔宽和侧壁熔深均有负面影响。送丝速度在 6.0~6.5 m/min 区间内焊缝整体成形最好(图 3(b))。

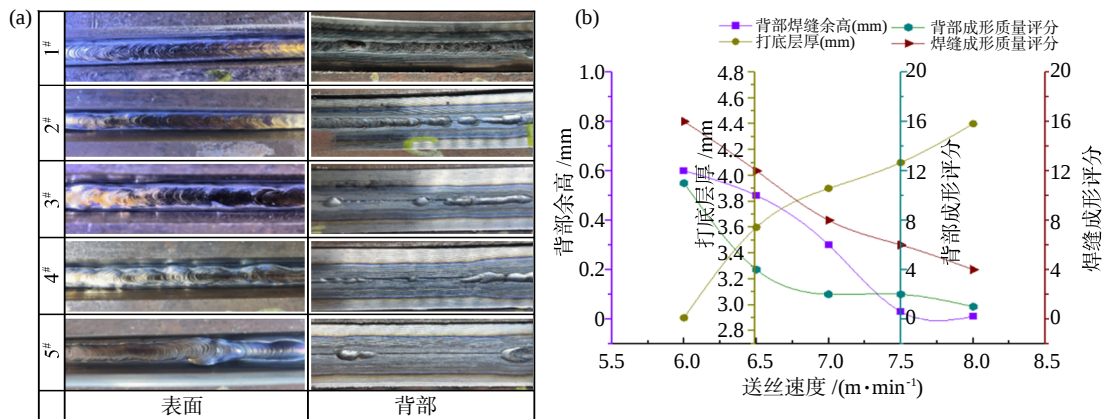


图 3 不同送丝速度下的焊缝形貌(a)及形貌变化曲线(b)

Fig.3 Weld morphologies (a) and morphology change curves (b) at different wire feeding speeds

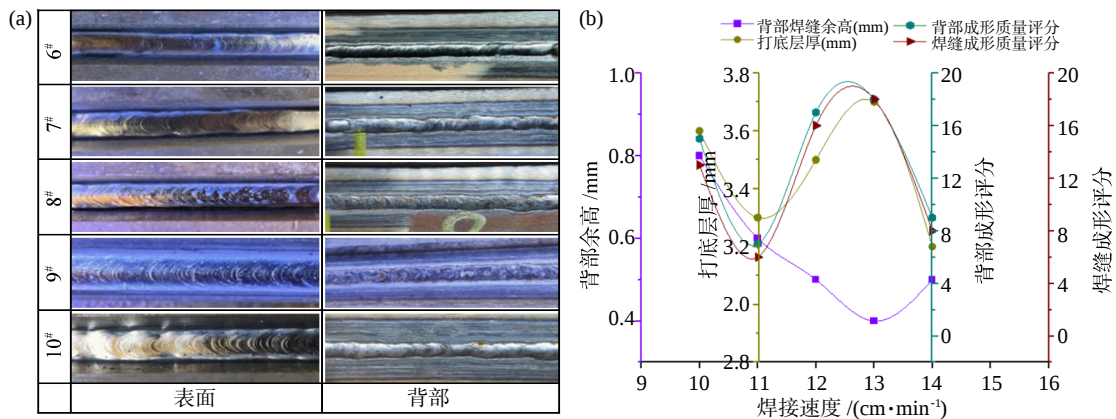


图 4 不同焊接速度下的焊缝形貌(a)变化曲线(b)

Fig.4 Weld morphologies (a) and morphology change curves (b) at different wire welding speeds

2.3 焊接电流对焊缝成形的影响

图 5(a)为不同焊接电流下的焊缝形貌及形貌变化曲线图。如图 5 所示,11# 焊缝背部成形不连续,这是由于焊接电流小,线能量不足,熔融金属难以穿透母材在背部形成连续焊缝。12# 焊缝表面成形略微凸起,起弧位置附近侧壁熔合差,起弧不稳定。随焊接电流持续增加,背部焊缝熔覆金属的铺展性明显变好,表面焊缝平整且连续。当焊接电流为 150 A

2.2 焊接速度对焊缝成形的影响

由图 4(a)焊缝形貌可知,各参数组合下均能形成完整的背部焊缝,但焊接速度小,背部焊缝余高过高。随着焊接速度的增加,7# 焊缝形貌得到改善,背部焊缝余高较小。8#、9# 焊缝整体成形平整且连续,背部焊缝成形一致性较好,表面焊缝鱼鳞状明显,二者相比 9# 焊缝成形更好。10# 焊缝形貌与 9# 相比,背部焊缝余高增加、一致性差。观察图 4(b)曲线图,背部焊缝余高在焊接速度 13 cm/min 处降至最小。

时,线能量大,熔融金属下坠明显,余高较高(图 5(b)),易出现应力集中、裂纹等缺陷。

综上所述,单因素试验结果表明各因素变化对表面和背部焊缝成形的影响规律几乎一致。当送丝速度、焊接速度、焊接电流分别在 6.0~6.5 m/min、12~14 cm/min、140~145 A 时,焊缝成形质量较好。具体分析,在其他参数不变的情况下,送丝速度为 6.5 m/min、焊接电流为 145 A、焊接速度为 13 cm/min

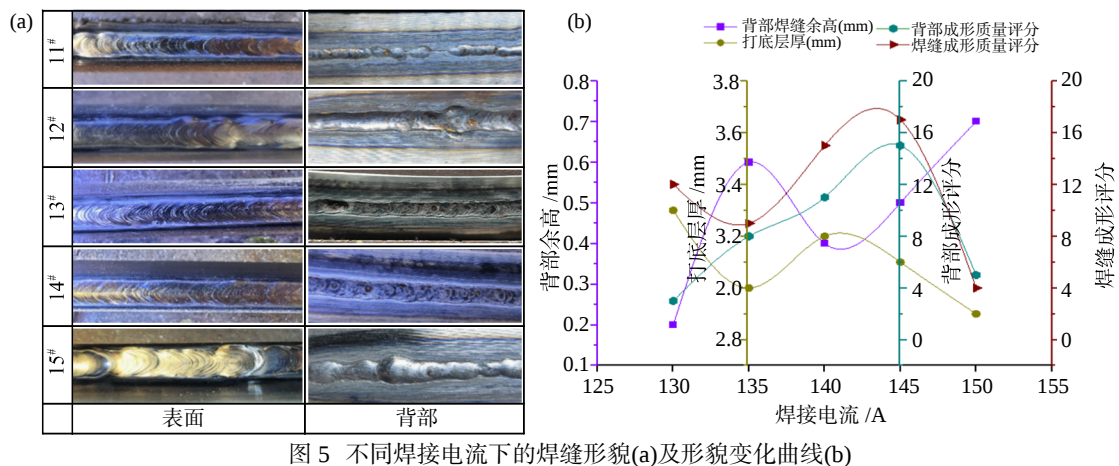


图5 不同焊接电流下的焊缝形貌(a)及形貌变化曲线(b)

Fig.5 Weld morphologies (a) and morphology change curves (b) at different welding currents

时,焊缝表面和背部成形更好。

3 基于 Design-Expert 软件的试验结果分析

考虑到单因素变化分析仅关注了单一因素对焊缝成形的影响,却忽略了多个因素之间的相互作用。因此,本研究采用基于 Design-Expert 软件的响应曲面法,进一步分析工艺参数的影响规律。Design-Expert 软件的功能涵盖试验设计、回归分析和预测优化三部分。利用该软件,可对所选试验进行试验方法选择,确定试验的因素水平及试验指标;对试验结果进行数据分析,建立试验因素与指标间的数学模型;进行方差分析,剖析试验因素水平变化对试验指标的影响;通过设置优化准则,能够优化确定最佳试验组合(数值解)或区间(图形解)^[16]。Box-Behnken 设计响应试验参数组合如表 4 所示。

3.1 表面焊缝成形影响因素分析

显著性用于评估系数之间的关联性是否由随机因素导致。F 值越大且 P 值越小,越能表明相关系数的显著性。表 5 为回归模型方差分析结果。可以看出,该模型的 F 值为 61.53 且 P 值极小,模型的显著性好。一次项 A、B、C 的 F 值很大,且 $A > C > B$ 即该模型分析出各因素对表面焊缝成形的显著性影响程度为送丝速度 > 焊接电流 > 焊接速度。交互项 AC 和二次项 A^2 的 P 值均小于 0.0001,表明送丝速度对焊接成形影响的显著性更高,而 BC 的 P 值为 0.3863,表示焊接速度对模型的显著性影响不明显。此外,失拟项的 F 值为 2.08,表现为不显著,说明模型误差在有效范围内,分析结果符合预期。该模型的决定系数 $R^2=0.9875$,校正决定系数 $R^2_{adj}=0.9715$,证实该模型能

表 4 Box-Behnken 设计响应试验参数组合

Tab.4 Parameter combination of Box-Behnken design response test

工艺编号	A- 送丝速度 v_f /($m \cdot min^{-1}$)	B- 焊接速度 v_w /($cm \cdot min^{-1}$)	C- 焊接电流 I /A
1	6.0	10	130
2	6.0	11	135
3	6.0	12	140
4	6.0	13	145
5	6.0	14	150
6	6.5	10	135
7	6.5	11	140
8	6.5	12	145
9	6.5	13	150
10	6.5	14	130
11	7.0	10	140
12	7.0	11	145
13	7.0	12	150
14	7.0	13	130
15	7.0	14	135
16	7.5	10	145
17	7.5	11	150
18	7.5	12	130
19	7.5	13	135
20	7.5	14	140
21	8.0	10	150
22	8.0	11	130
23	8.0	12	135
24	8.0	13	140
25	8.0	14	145

准确反映各因素与响应值之间的定量关系^[17-18]。

3.2 背部焊缝成形影响因素分析

表 6 为背部焊缝成形的回归模型方差分析结果。可以看出,模型的 F 值为 32.94 且 P 值极小,模

表 5 表面焊缝成形的回归模型方差分析结果
Tab.5 Regression model variance analysis results
of weld surface forming

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性
模型	9	162.19	18.02	61.53	<0.0001	**
A- 送丝速度	1	32.00	32.00	109.27	<0.0001	**
B- 焊接速度	1	21.13	21.13	72.13	<0.0001	**
C- 焊接电流	1	28.13	28.13	96.04	<0.0001	**
AB	1	4.00	4.00	13.66	0.0077	**
AC	1	25.00	25.00	85.37	<0.0001	**
BC	1	0.25	0.25	0.8537	0.3863	-
A ²	1	20.84	20.84	71.18	<0.0001	**
B	1	16.42	16.42	56.08	0.0001	**
B ²	1	9.16	9.16	31.28	0.0008	*
残差	7	2.05	0.2929	-	-	-
失拟项	3	1.25	0.4167	2.08	0.2451	-
误差	4	0.8000	0.2000	-	-	-
总变异	16	164.24	-	-	-	-
R ² =0.9875 R ² _{adj} =0.9715						

注:**P<0.0001 表示差异极显著,*P<0.005 表示差异显著

型的显著性好。一次项 A、B、C 的 F 值较大,且 B>C>A,即该模型分析出各因素对背部焊缝的显著性影响程度为焊接速度>焊接电流>送丝速度。交互项 AC 和二次项 B²、C² 的 P 值很小,显著性更好,AB 的 P 值为 0.5053,模型显著性不明显。失拟项的 F 值为 0.3571,失拟项表现为不显著,说明该模型误差良好,没有明显受到干扰因素影响。模型的决定系数 R²=0.9769,校正决定系数 R²_{adj}=0.9473,证实该模型能准确反映各因素与响应值之间的定量关系^[17-18]。

3.3 响应曲面图与等高线图分析

响应曲面图能反映不同因素变化对响应值的影响。响应曲面图越陡峭,因素间的交互作用越明显,等高线越密集、越接近椭圆,因素间的交互作用越强^[19]。本试验采用二阶模型拟合响应曲面模型,并根据二阶模型关系式绘制响应曲面图,并将响应曲面图投影为等高线图。

以表面和背部焊缝成形评分为响应值,采用二阶模型线性回归关系方程,在 Origin 软件中绘制响应曲面图形及等高线图形。式(1)、(2)分别为表面焊缝及背部焊缝成形评分的二阶模型关系方程。

$$Y_1 = -776.825 - 59.3A + 32.725B + 10.335C + 2AB + AC + 0.05BC - 8.9A^2 - 1.975B^2 - 0.059C^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = -2375.925 - 57.95A + 54.275B + 30.44C - 0.5AB + 0.8AC + 0.2BC - 4.1A^2 - 3.025B^2 - 0.131C^2 \quad (2)$$

式中:Y₁ 为表面焊缝成形评分响应值;Y₂ 为背部焊

表 6 背部焊缝成形的回归模型方差分析结果
Tab.6 Regression model variance analysis results
of back weld forming

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性
模型	9	150.33	16.70	32.94	<0.0001	**
A- 送丝速度	1	6.12	6.12	12.08	0.0103	*
B- 焊接速度	1	15.13	15.13	29.82	0.0009	*
C- 焊接电流	1	12.50	12.50	24.65	0.0016	*
AB	1	0.25	0.25	0.4930	0.5053	-
AC	1	16.00	16.00	31.55	0.0008	*
BC	1	4.00	4.00	7.89	0.0262	*
A	1	4.42	4.42	8.72	0.0213	*
B ²	1	38.53	38.53	75.97	<0.0001	**
C ²	1	45.16	45.16	89.05	<0.0001	**
残差	7	3.55	0.5071	-	-	-
失拟项	3	0.75	0.25	0.3571	0.7880	-
误差	4	2.80	0.7000	-	-	-
总变异	16	153.88	-	-	-	-
R ² =0.9769, R ² _{adj} =0.9473						

注:**P<0.0001 表示差异极显著,*P<0.005 表示差异显著

缝成形评分响应值;A 为送丝速度;B 为焊接速度;C 为焊接电流。

图 6 为 A 与 B 对表面焊缝成形质量影响的响应面及等高线。由图 6 可知,当送丝速度较低时,随着焊接速度的增加,表面焊缝成形评分增加,但增加趋势减小;当送丝速度在较高水平值时,随着焊接速度的增加,表面焊缝成形评分先增大后减小。送丝速度低水平值相对于高水平值,其响应面的倾斜程度更陡峭。等高线近似为圆形,说明送丝速度与焊接速度的交互作用对表面焊缝的影响不显著。

图 7 为 B 与 C 对表面焊缝成形质量影响的响应面 and 等高线图。由图 7 可知,在焊接速度低水平值时,随焊接电流的增加,表面焊缝成形评分先增加后减小。由表 5 可看出,BC 的 F 值为 0.8537,P 值>0.05,且等高线近似为圆形,说明焊接电流与焊接速度对表面焊缝成形评分的影响不显著。

图 8 为 A 与 C 对表面焊缝成形质量影响的响应面 and 等高线图。由图 8 可知,当送丝速度在低水平值时,表面焊缝成形质量评分随着焊接电流的增加而增加;当送丝速度在高水平值时,随着焊接电流的增加,表面焊缝成形评分变化不明显。观察等高线图可知,等高线呈椭圆形且椭圆度很高,观察交互项 AC 的 F 值为 85.37,P 值<0.0001,说明送丝速度与焊接电流的交互作用强且对表面焊缝成形评分影响

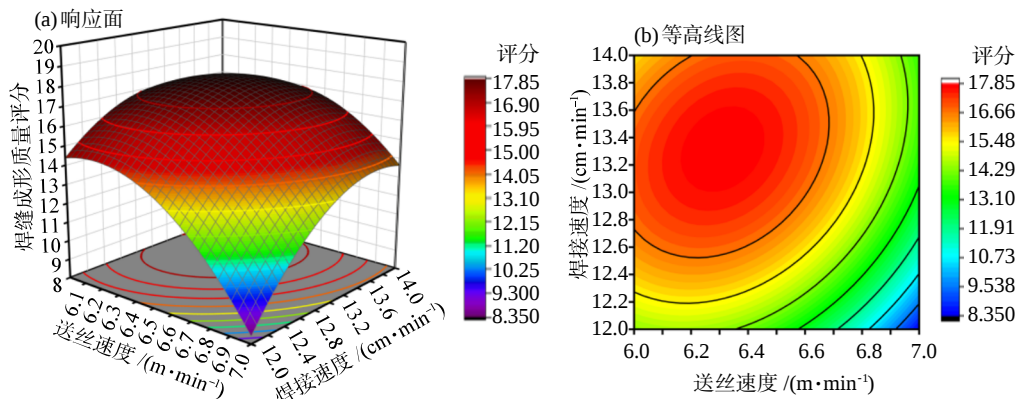


图 6 A 与 B 对表面焊缝成形质量影响的响应面和等高线图
Fig.6 Response surface and contour lines of the influence of A and B on the surface weld formation quality

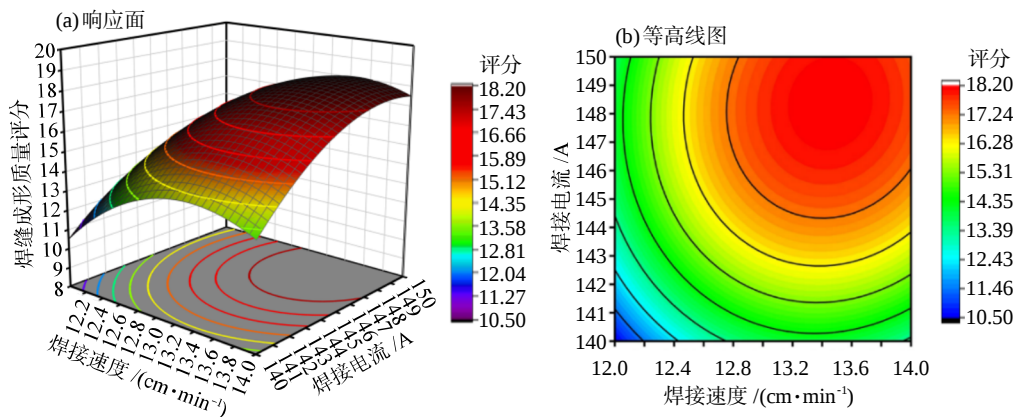


图 7 B 与 C 对表面焊缝成形质量影响的响应面和等高线图
Fig.7 Response surface and contour lines of the influence of B and C on the surface weld formation quality

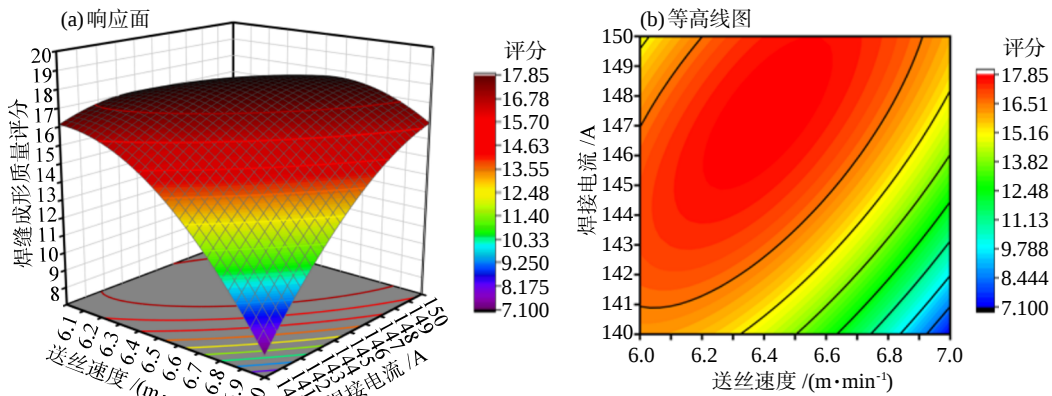


图 8 A 与 C 对表面焊缝成形质量影响的响应面和等高线图
Fig.8 Response surface and contour lines of the influence of A and C on the surface weld formation quality

极显著。通过回归方程、响应面和等高线可知表面焊缝成形评分最佳的参数组合为: $v_w=13\text{ cm/min}$, $I=145\text{ A}$, $v_f=6.5\text{ m/min}$ 。

图 9 为 A 与 B 对背部焊缝成形质量影响的响应面及等高线图。由图 9 可知,当焊接速度水平值较小时,随着送丝速度的增加,背部焊缝成形评分先增大后减小,响应曲面图较平缓。当送丝速度水平值较小时,随着焊接速度的增加,背部焊缝成形评分先增

大后减小,响应曲面图较陡峭。焊接速度对背部焊缝成形评分的影响更显著。

图 10 为 B 与 C 对背部焊缝成形质量影响的响应面和等高线图。由图 10 可知,在焊接速度低水平值时,随焊接电流的增加,背部焊缝成形评分先增加后减小,观察 BC 的 F 值 7.89, P 值 <0.05 ,但等高线近似为圆形,说明焊接电流与焊接速度对背部焊缝成形评分的影响不显著。

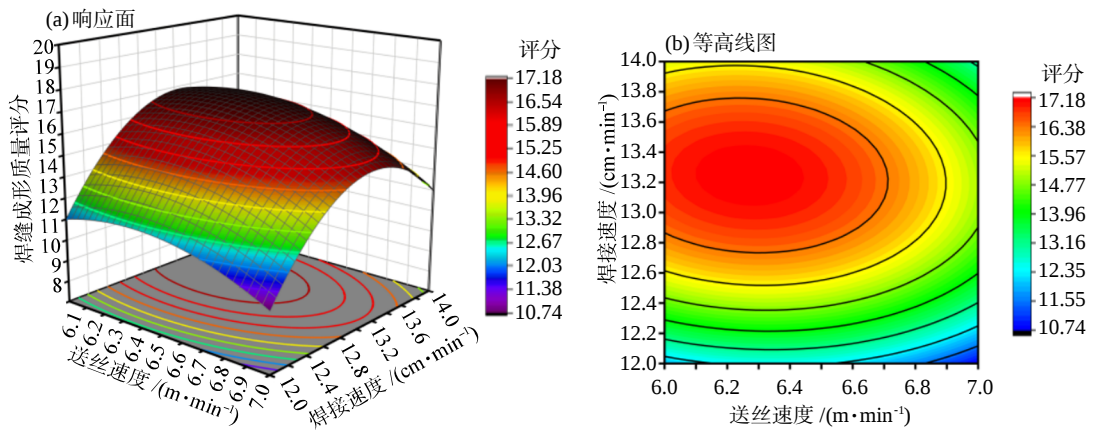


图9 A与B对背部焊缝成形质量影响的响应面和等高线图

Fig.9 Response surface and contour lines of the influence of A and B on the back weld formation quality

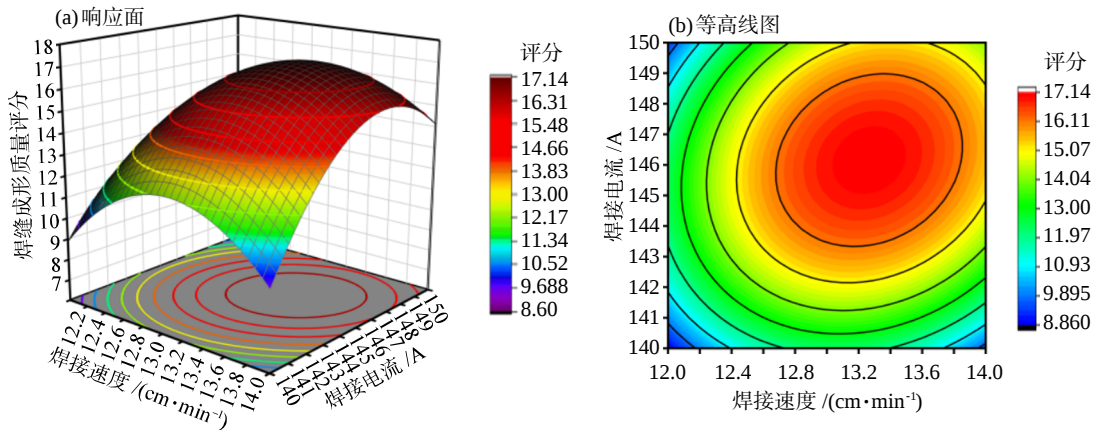


图10 B与C对背部焊缝成形质量影响的响应面和等高线图

Fig.10 Response surface and contour lines of the influence of B and C on the back weld formation quality

图11为A与C对背部焊缝成形质量影响的响应面和等高线图。由图11可知,当送丝速度水平值较小时,随着焊接电流的增加,背部焊缝成形质量评分先增大后减小,响应曲面倾斜度高,且等高线图为椭圆形,交互项AC的F值为31.55,P值为0.0008,小于0.05,说明送丝速度与焊接电流的交互作用强且对背部焊缝成形评分影响显著。

综合分析可知,背部焊缝成形的最优参数组合与表面成形参数一致,为 $v_w=13\text{ cm/min}$, $I=145\text{ A}$, $v_f=6.5\text{ m/min}$ 。

4 工艺试验结果

采用单因素法和响应曲面法试验,最终得出优化的焊接工艺参数为送丝速度 6.5 m/min 、焊接速度

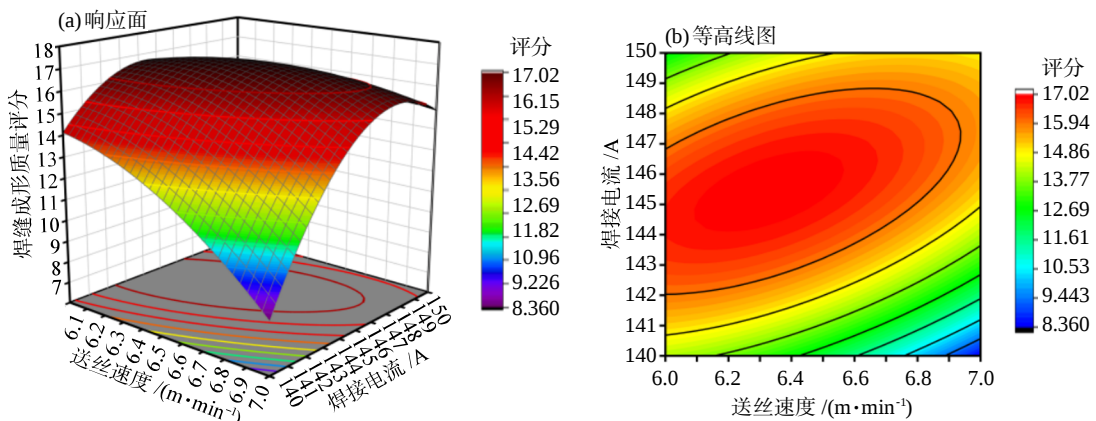
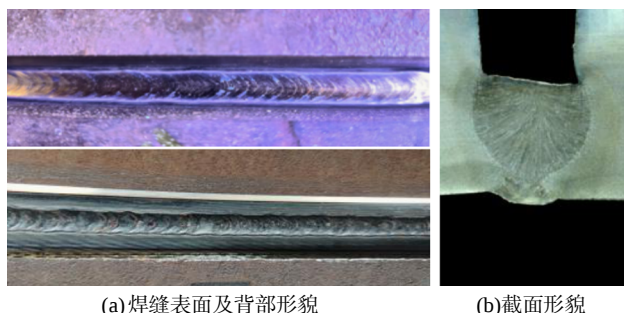


图11 A与C对背部焊缝成形质量影响的响应面和等高线图

Fig.11 Response surface and contour lines of the influence of A and C on the back weld formation quality

13 cm/min、焊接电流 145 A。采用该工艺参数进行管道打底焊接试验,焊缝表面和截面形貌如图 12 所示。取垂直于焊接方向的截面作为金相观察面,观察其截面组织,如图 13 所示。



(a) 焊缝表面及背部形貌 (b) 截面形貌
图 12 焊缝的表面和截面形貌
Fig.12 Surface and cross section morphologies of the weld seam

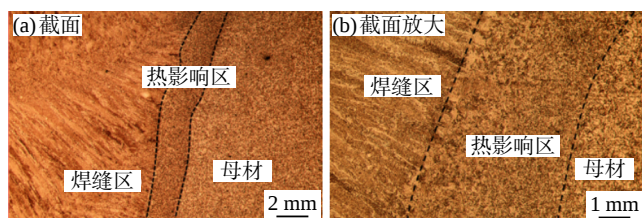


图 13 焊缝截面的微观组织
Fig.13 Microstructure of cross section of the weld seam

从图 12(a)可知,钨极氩弧焊打底层焊缝表面成形美观,呈现均匀波纹状,外观上无缺陷^[20];背部焊缝成形整体连续。如图 12(b)所示,焊缝截面侧壁熔合均匀,未出现气孔、未焊透、未熔合等缺陷。焊缝截面为“漏斗状”,呈外壁宽、内壁窄形貌。这是由于一方面在 TIG 焊接中主要热源能量沿深度衰减,另一方面熔池对流与散热条件的差异,导致内壁的焊缝宽度较小^[11]。

由图 13 可见焊缝区、热影响区、母材三区界限清晰,组织过渡平缓。焊缝区呈典型的柱状晶形态,热影响区晶粒适度长大,未见显微裂纹、气孔、夹渣等冶金缺陷,整体组织连续性良好,表明焊接工艺参数匹配合理,焊接质量优良。

综上,焊缝表面形貌、截面宏观组织、微观组织形貌均达到预期效果,证实焊接参数适宜。

5 结论

(1) 通过单因素试验研究焊接速度、焊接电流、送丝速度对焊缝形貌的影响。各因素对表面和背部焊缝成形的影响规律具体表现为:增大送丝速度能使打底层厚增加,熔深增大;增大焊接速度,线能量

减小,易出现侧壁熔合不均匀、未焊透现象,影响背部焊缝成形;焊接电流增大,一定程度上促进单面焊双面成形,电流过大出现容易造成熔滴下坠甚至焊穿等缺陷。当送丝速度、焊接速度、焊接电流分别为 6.0~6.5 m/min、12~14 cm/min、140~145 A 时,焊缝成形质量较好。

(2) 通过曲面响应法进行管道焊接打底试验,最终得到的最佳参数组合为送丝速度 6.5 m/min、焊接速度 13 cm/min、焊接电流 145 A。

(3) 采用最佳工艺参数进行焊接试验,结果表明焊缝表面成形良好、美观,背部焊缝成形整体连续,侧壁熔合均匀,且截面宏观组织形貌无气孔、未焊透等缺陷,达到预期效果。

参考文献:

- [1] 徐润生,何晓霞,张建良,等. 可再生能源实现低碳炼铁的途径探讨[J]. 钢铁研究学报,2024,36(3):275-282.
- [2] 张卫国,张宗旺,徐润生,等. 富氢气体喷吹对高炉冶炼工况的影响规律[J]. 钢铁研究学报,2023,35(9):1065-1073.
- [3] 于樾,王锋,齐渊洪,等. 氢基直接还原铁工艺技术及应[J]. 钢铁研究学报,2024,36(3):283-298.
- [4] Laureys A, Depraetere R, Cauwels M, et al. Use of existing steel pipeline infrastructure for gaseous hydrogen storage and transport;a review of factors affecting hydrogen induced degradation [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022,101(5):104-134.
- [5] Barreto L, Makihira A, Riahi K. The hydrogen economy in the 21st century:a sustainable development scenario[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2003,28(3):267-284.
- [6] 杨俊明,胡才媛,段涛,等. STT 及 RMD 根焊技术在长输管道中的应用[J]. 化工管理,2014(21):114.
- [7] 胡玉. CMT 焊接 S32101 双相不锈钢焊缝成形研究[J]. 金属加工(热加工),2024(3):76-82.
- [8] 陈家河. 高强铝合金机器人双面双弧自动焊接工艺研究[D]. 南京:南京理工大学,2015.
- [9] 雷青娟. 薄壁、大口径连续油管对接焊热积累效应研究[D]. 西安:西安石油大学,2013.
- [10] Xu T L, Guo S H, Fu B W, et al. Hydrogendiffusion simulation of the X80 pipeline steel girth weld zone considering the synergistic effect of the structure-stress-concentration field [J]. Engineering Failure Analysis,2024,160:108205.
- [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.
- [12] Araujo L S, Guimarães A V, Siqueira M C, et al. The influence of the processing route on the fragmentation of (Nb,Ti) C stringers and its role on mechanical properties and hydrogen embrittlement of nickel based alloy 718 [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2021,46(29):16164-16178.

(下转第 46 页)

接头组织的均匀性,热输入稳定性差会造成焊接接头力学性能降低,如断裂韧性降低^[11-14],因此机器人焊接接头的质量优于人工焊接。

3 结论

(1) 开发了一套满足海上风电大型导管架相贯线焊接的智能焊接系统,通过 ROBOGUIDE 软件完成机器人焊接可达性分析,3D 视觉扫描识别相贯线焊接路径和焊接坡口信息,理论计算相贯线焊接轨迹,使用 Matlab 模拟焊缝及焊枪姿态,指导机器人完成了导管架相贯线焊接。

(2) 相比人工焊,机器人焊的焊接稳定性更好,机器人焊的焊接热输入范围为 11.4~12.5 kJ/cm,人工焊的热输入范围为 10.2~13.9 kJ/cm。

(3) 对比人工焊和机器人焊接的相贯线接头组织和性能,机器人焊接接头组织均匀性更好,硬度变化更小、冲击吸收功指标更优。

参考文献:

- [1] 孟晨. 海上风电机组及基础结构动力特性研究[D]. 大连:大连理工大学,2024:43-46.
- [2] 朱永斌. 7MW 海上风机桩基础结构方案设计与特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019:40-44.
- [3] 历超,孙志广,张彬. 海洋平台 TKY 节点 6GR 位置焊接技术[J]. 电焊机,2020,80(8): 83-85.
- [4] 李勇,陆臻. 海上平台管节点 6GR 位置焊接工艺方法[J]. 焊接,2004(7):37-38.
- [5] 俞希伟. 导管架 T/K/Y 节点相贯口部位焊接成型控制方法[D]. 福州:福建工程学院,2021:1-5.
- [6] 胡旭宇,柴薇薇,李叶龙. 相贯线焊缝焊接机器人的结构设计与分析[J]. 信息系统工程,2025(6):51-54.
- [7] 范晨晖,刘欢,刘玄,等. 基于相贯线焊缝的机器人焊接轨迹优化[J]. 机械传动,2024(10):1-9.
- [8] 邹义龙,胡卫欢,胡一龙,等. 焊接机器人管-管相贯线焊接工艺试验研究[J]. 河北建筑工程学院学报,2024,42(2):187-191.
- [9] 钟凯强,周建平,薛瑞雷,等. 一种采用 Lagrange 插值的相贯线简化算法[J]. 热加工工艺,2021,50(15):131-140.
- [10] 崔成武,高雅楠,吕振博,等. X80 钢管线全自动焊接头的组织与性能研究[J]. 热加工工艺,2025,54(17):79-83.
- [11] 曹胜利,张庆军,张彩军. 焊接热输入对 EH420 海工钢热影响区组织和性能的影响[J]. 中国冶金,2025,35(4):58-66.
- [12] 罗家元,谭超,李鑫. 残余应力对焊接接头动态力学性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程,2022,46(6): 31-36.
- [13] 康琳琳. 组织不均匀性对 DH36 钢焊接接头断裂力学性能的影响[D]. 青岛:中国石油大学,2020:18-44.
- [14] 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. 
- [13] 高琦. 中厚度船用钢的焊接技术及其性能研究[D]. 大连:大连海洋大学,2020.
- [14] 黎国宁. 铝合金 MIG 焊接熔滴过渡行为及焊缝成形研究[D]. 太原:中北大学,2023.
- [15] 周彦彬. MAG-TIG 双电弧热源中厚板打底单面焊双面成形研究[D]. 大连:大连理工大学,2019.
- [16] 顿国强,姜新波. 基于 Design-expert 的试验设计与统计课程研究生教学改革实践[J]. 安徽农业科学,2021,49(21): 280-282.
- [17] Dietz M R, Schiffo T V M, Maiocchi G M, et al. Effect of high-intensity ultrasound on cowpea flours optimized by response surface methodology and the impact on their techno-functional properties [J]. Food Bioscience,2025 (3): 106469-106474.
- [18] Wu X, Zhang B, Zhang Q, et al. Optimization of the response surface for semi-dry preparation of acetylated chickpea starch and its structural, physicochemical and in vitro digestibility[J]. LWT,2025(3):17764-117769.
- [19] 罗凯,黄秀芳,周毅峰,等. 响应面试验优化复合酶法提取碎米芽多糖工艺及其抗氧化活性[J]. 食品科学,2017,38 (4): 237-242.
- [20] 朱旻,罗晓军,尹燕,等. TP321 钢管的窄间隙热丝 TIG 焊[J]. 焊接学报,2016,37(9):79-82. 

(上接第 38 页)