

## 小直径螺旋焊管 TIG 焊补焊工艺技术与应用

蒋永峰, 任 虎, 冯宗泽, 陈 雷, 刘 威, 任 超

(江苏玉龙钢管科技有限公司, 江苏 无锡 214183)

**摘要:** 小直径螺旋焊接钢管补焊工艺, 长期以来一直受到空间位置的约束, 因其口径小, 工人无法采用焊条电弧焊对内焊缝缺陷进行修补, 因此焊接质量一直是制约企业发展的瓶颈。为确保产品质量, 企业对小直径螺旋缝埋弧焊管采用 TIG 焊补焊工艺技术, 实现单面焊双面成型, 优化焊接工艺参数, 分析操作技能, 匹配合适的焊接材料, 提出合理的施工方案及解决措施。经生产验证, 产品各项性能指标均满足 GB/T 9711—2023 PSL2 标准及客户技术要求, 使用效果良好。

**关键词:** 螺旋缝焊接钢管; 小直径; 单面焊双面成型; TIG 焊补焊工艺

DOI:10.19938/j.steelpipe.1001-2311.2024.6.40.45

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Analysis and Application of TIG Repair Welding Technology for Small-sized Spiral Welded pipe

JIANG Yongfeng, REN Hu, FENG Zongze, CHEN Lei, LIU Wei, REN Chao

(Jiangsu Yulong Steel Pipe Technology Co., Ltd., Wuxi 214183, China)

**Abstract:** Conducting the repair welding process of the small-sized spiral welded steel pipe has been constrained for so long a time by limited operation space, which means due to the small size of the pipe, the operator cannot use the electrode arc welding to repair inner weld defects, and as a result, the welding quality has been always a bottleneck as restricting the development of relevant pipe-making companies. In order to ensure the product quality, the company uses TIG welding repair welding technology for small-diameter spiral welded pipes to realize single-sided welding and double-sided formation, meanwhile actions such as optimizing the welding process parameters, analyzing the operating skills, and properly matching the welding materials are taken as per relevant reasonable construction plan and solutions. The actual production verification proves that all the performance indicators of the product have met Standard GB/T 9711—2023 PSL2 and relevant customer's technical requirements, and the application effectiveness is good.

**Key words:** spiral welded steel pipe; small-sized; single-sided welding and double-sided forming; TIG repair welding process

随着螺旋缝埋弧焊管工艺技术的日臻完善, 小直径大壁厚螺旋缝埋弧焊管的发展, 将会成为未来行业发展的趋势, 特别是高钢级输油、输气、供水、供暖、城市管网的开发与应用<sup>[1]</sup>。但由于小直径螺旋缝埋弧焊管受到空间位置的局限性, 内焊缝缺陷只能从钢管外表面将原焊缝刨开, 采用焊条电弧焊补焊工艺进行修复。经检验: 补焊缝表面成型

不够平缓过渡、凹凸不平; 焊缝熔池内部容易出现气孔、夹渣、未熔合等缺陷; 焊接接头力学性能不稳定。因此, 企业在生产小直径螺旋缝埋弧焊管时, 不得不采取切除或降级的办法, 以保证产品质量, 这样便加大企业生产成本投入, 无法凸显行业竞争优势。为此, 对小直径螺旋缝埋弧焊管进行补焊缝, 对实施钨极氩弧焊 TIG 焊补焊单面焊双面成型工艺进行探索与应用。

某公司根据 GB/T 9711—2023《石油天然气工业 管线输送系统用钢管》PSL2 标准及客户技术条件要求对  $\Phi 323.9 \text{ mm} \times 9.53 \text{ mm X60M}$  委内瑞拉输

蒋永峰(1968-), 男, 国际焊接工程师, 长期从事螺旋缝埋弧焊焊接钢管成型、焊接工艺技术研究及管理工作。

油管线的补焊缝工艺进行研究,通过分析研究确定了合理的操作工艺现介绍如下<sup>[2-3]</sup>。

## 1 各工艺性能对比分析

### 1.1 TIG 焊工艺特点

TIG 焊即钨极惰性气体保护焊,其是在惰性气体的保护下,利用钨极与工件之间产生的电弧热来融化母材和填充金属的焊接方法<sup>[4-5]</sup>。

(1) 优点:在惰性气体保护下焊接所有金属材料,工艺性能好,电弧稳定无飞溅、烟雾少,可全位置焊接,是实现单面焊双面成型最理想的焊接方法。TIG 焊工艺能够获得纯净、成型美观且热影响区小的焊缝,是一种低氢焊接方法,冷裂纹倾向低于手工电弧焊,适合对质量要求较高的管线焊接。

(2) 缺点:熔深浅、生产效率低,钨极载流不易过大,焊接时需采用防风措施。

### 1.2 熔化极气体保护焊工艺特点

熔化极惰性气体保护焊(MIG)、熔化极活性气体保护焊(MAG)都是熔化极气体保护焊,以熔化的金属焊丝作为电极,并用气体作为保护的电弧焊,MIG 焊采用的惰性气体保护,MAG 采用的是氧化性气体保护。

(1) 优点:焊接效率高,焊缝金属含氢量低,焊接变形小,全位置焊接,飞溅小,烟雾少,适合规模生产环境。

(2) 缺点:受环境制约,室外工作环境需配备防风装置,设备复杂,维护和使用要求较高,较焊条电弧焊(SMAW)灵活性差。

### 1.3 焊条电弧焊工艺特点

利用电弧放电(俗称电弧燃烧)所产生的热量将焊条与工件互相熔化并在冷凝后形成焊缝,从而获得牢固接头的焊接过程。

(1) 优点:设备简单,便于操作,不需要辅助气体防护,并且具有较强的抗风能力,可以焊接各

种材料,应用广泛。

(2) 缺点:生产效率低,技术要求高,全位置焊接难度大,易产生焊接缺陷;依赖性强,焊条电弧焊的焊缝质量要通过调节焊接电源、焊条型号、焊接工艺参数及焊工的操作技巧和经验获得;焊工劳动强度大,劳动条件差,焊工始终在高温烘烤和有有毒烟尘环境中进行手工操作及眼睛观察;焊前应对焊件进行坡口、锈蚀、清根等处理,焊条需按工艺要求进行烘干,焊后应进行清渣修磨等。

### 1.4 埋弧焊(SAW)工艺特点

电弧在焊剂层下燃烧进行焊接的方法,全称埋弧自动焊。

(1) 优点:生产效率高,焊缝质量好,劳动条件优越,节能降耗。

(2) 缺点:仅适用于平焊位置,有利于长焊缝焊接,焊接设备辅助装置复杂,灵活性差,适宜壁厚为中厚板以上板材。

综上所述:依据 TIG 焊工艺特点及小直径钢管贯穿性缺陷的特性,且小直径较小无法进入钢管内部进行焊接的特点,要确保补焊缝焊接质量的稳定性,且内外焊缝表面成型美观,焊缝韧性好,热影响区小等要素。因此,采用 TIG 焊补焊工艺,对小直径管线  $\Phi 323.9 \text{ mm} \times 9.53 \text{ mm}$  钢管补焊工艺进行实施应用<sup>[6-11]</sup>。

## 2 试验材料和方法

产品采用的低合金钢材料 X60M,强度高、韧性好<sup>[4]</sup>,其化学成分见表 1,力学性能见表 2,与焊接材料 ER50-G 焊丝(GB/T 8110—2008《气体保护电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝》)和纯 Ar 保护气体相匹配,具有优良的焊接工艺性能、力学性能、电弧稳定、焊缝成型美观,适用于碳钢及低合金钢 X60M 的单道焊或多道焊。焊丝化学成分见表 3,焊丝熔敷金属力学性能见表 4。

表 1 X60M 钢级热轧卷板化学成分(质量分数)及碳当量分析

项目	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
实测值	0.08	0.22	1.43	0.011	0.002	0.005	0.145	0.002	0.002
技术要求	≤0.12	≤0.45	≤1.60	≤0.025	≤0.015	≤0.50	≤0.50	≤0.50	-
项目	Cu	Ti	Nb	Al	N	B	Nb+V+Ti	CE <sub>Pcm</sub>	CE <sub>Mn</sub>
实测值	0.008	0.016	0.036	0.046	0.006	0.000 1	0.054	0.17	0.35
技术要求	≤0.50	-	-	-	-	-	≤0.015	≤0.25	≤0.43

表2 X60M 钢级热轧卷板力学性能

项目	试样尺寸/mm	屈服强度 $R_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 $R_m$ /MPa	伸长率 $A$ /%	屈强比 $R_{0.2}/R_m$
实测值 1	9.53×38.30	443	570	38	0.78
实测值 2	9.53×38.30	448	562	39	0.80
技术要求	9.53×38.1	415~565	520~720	≥23.0	≤0.93

表3 TIG 焊丝主要化学成分(质量分数)

项目	C	Si	Mn	P	S	Ni	V	Mo	Cu	Cr
实测值	0.073	0.84	1.48	0.011	0.011	0.009	0.001	0.011	0.100	0.029

表4 TIG 焊丝熔敷金属力学性能

项目	屈服强度 $R_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 $R_m$ /MPa	伸长率 $A$ /%	-40℃夏比 V 型缺口冲击功/J
实测值	443	573	32.5	151/155/139

### 3 操作要领

(1) 焊接过程中应保持正确的焊接姿势, 随时调整焊枪角度及喷嘴与焊件距离, 并且随时观察钨极烧损情况。当钨极呈银白色时, 说明保护效果好; 当钨极端部呈蓝色时, 说明保护效果较差; 如果钨极端部呈黑色或成球状, 说明钨极已被污染, 此时, 应打磨钨极端部, 并调节气体流量<sup>[5-6]</sup>。

(2) 引弧: 主要有 3 种引弧方式——接触引弧, 短路引弧, 引弧器引弧。但针对单面焊双面成型焊接, 一般采用接触法引弧, 当采用接触法引弧时, 最好使用引弧板, 以防止钨极接触坡口而产生夹钨现象。当电弧引燃后, 迅速拉长电弧对焊件坡口及根部进行预热, 然后填丝焊接。

(3) 运弧: 焊接过程中方向一般为由右向左焊接, 焊炬与工件表面呈 65°~85°夹角, 焊丝置于熔池前方并与工件呈 15°~20°夹角, 尽量采用短弧焊, 并均匀送丝, 这样才能确保焊缝成型美观。

(4) 收弧、接头: 收弧时适当填充焊丝, 使弧坑填满, 以防止弧坑裂纹, 且在收尾处将焊缝焊成斜坡状, 不得产生死角, 以防止在接头时产生焊接缺陷; 接头时可在原收弧处拉长电弧稍作预热, 然后压低电弧移至斜坡收弧处, 开始填丝焊接。

(5) 填丝: TIG 焊填丝方法有两种, 连续填丝和断续填丝。

## 4 焊接工艺分析及操作

### 4.1 焊接工艺分析

(1) X60M 材料为热机械轧制管线用钢, 在轧

制过程中采用控冷控轧工艺, 因此, 钢的纯度高、组织均匀、晶粒细化、强度高、韧性好。在冶炼过程中尽可能地降低 C、S、P 的含量, 并适当添加 Nb、V、Ti、Ni 等合金元素, 这样既保证材料的性能, 又确保材料的可焊性<sup>[7]</sup>。

(2) 钢中含碳量的降低, 焊接氢致裂纹敏感性降低, 淬硬倾向减小, 但由于管线钢焊接时经历着一系列复杂的物理化学过程及随着强度级别的提高、板厚的加大, 在焊接区域造成焊接缺陷, 或使焊接接头性能降低, 主要表现为焊接裂纹、焊缝韧性指标降低和焊接热影响区脆化。因此, 在实施焊接过程中应严格控制线能量、减小层间热输入、焊后焊缝保温缓冷, 避免因热量过高或冷却过速使焊缝产生焊接裂纹、韧性指标降低、焊接热影响区脆化, 而焊接热影响区的脆化和焊接裂纹往往是造成管线发生断裂, 诱发灾难性事故的根源<sup>[8]</sup>。

### 4.2 坡口设计

为了获得全熔透、强度高、韧性好的焊接接头, 对补焊缝焊接接头采用 V 形坡口型式设计<sup>[3]</sup>。如图 1 所示。

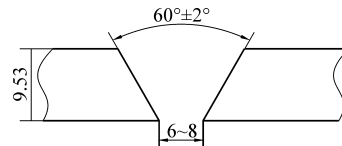


图1 X60M 焊管焊接坡口设计示意

### 4.3 焊接工艺试验

(1) 焊前准备: 用碳弧气刨将工件按照图 1 规定型式制备焊接接头试样, 碳弧气刨完成后, 用角向砂轮机打磨坡口面两侧的飞溅、夹碳, 并采用刷理方法清除坡口两侧外表面 20~30 mm 的锈蚀、氧化物等, 以避免在焊接过程中产生焊接缺陷<sup>[9]</sup>。

(2) 试验条件: 采用 WS-400 逆变式直流氩弧

焊机作为焊接电源；焊枪：WP-18 型 TG 焊枪、钨钨电极 WC20；焊接母材 X60M 低合金钢；焊接材料 ER50-G 焊丝(GB/T 8110)和纯 Ar 保护气体；坡口型式： $60^{\circ}\pm 2^{\circ}$  V 型；焊接位置：水平位置(1G)；焊接极性：直流反接(DC<sup>+</sup>)<sup>[10]</sup>。

(3) 过程控制：施焊前严格按照工艺要求调整

工艺参数，并根据产品技术要求在焊接过程中严格控制线能量、层间热输入，并对焊缝采用保温、缓冷措施。防止因热输入过高造成焊接裂纹、焊缝韧性指标降低、焊接热影响区脆化及合金元素烧损，以确保焊接接头性能指标<sup>[8]</sup>。焊接工艺参数见表 5。

表 5 X60M 钢管  $\Phi 323.9$  mm $\times$ 9.53 mm 螺旋缝埋弧焊钢管焊接工艺参数

焊层	焊丝直径/ mm	焊接电流/ A	焊接电压/ V	钨极直径/ mm	喷嘴直径/ mm	钨极伸出 长度/mm	氩气流量/ (L $\cdot$ min <sup>-1</sup> )	焊接速度/ (cm $\cdot$ min <sup>-1</sup> )	焊接极性
打底	2.5	110~120	16~18	2.4	6.0	6~8	8~10	6~8	DC <sup>+</sup>
填充盖面	2.5	120~140	22~24	2.4	6.0	6~8	10~12	8~10	

## 5 试验结果与讨论

对 X60M 钢级  $\Phi 323.9$  mm $\times$ 9.53 mm 螺旋缝埋弧焊钢管进行了金相组织、拉伸性能、导向弯曲性能、夏比冲击韧性、落锤撕裂、硬度等性能进行检测，结果如下。

### 5.1 宏观及金相组织

采用上述焊接工艺对所焊试件按照 GB/T 9711—2023 PSL2 标准及客户技术条件进行无损检测，未发现有超标缺陷，焊接接头融合良好。

焊缝端面形貌及外观如图 2~3 所示。扫描电镜 GX41 下的焊缝、热影响区显微组织如图 4 所示，由图可见：焊缝组织为晶内针状铁素体+粒状贝氏体+多边形铁素体；热影响区组织为粒状贝氏

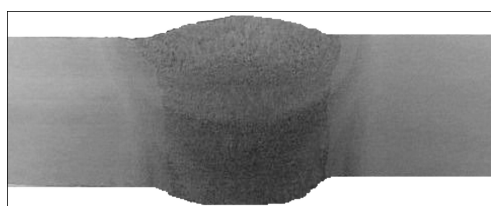


图 2 X60M 螺旋焊管焊缝宏观

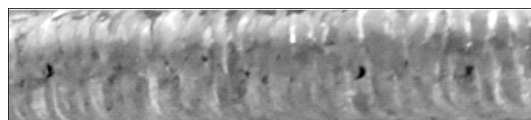
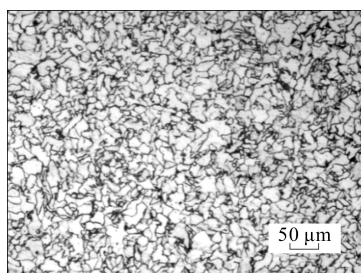
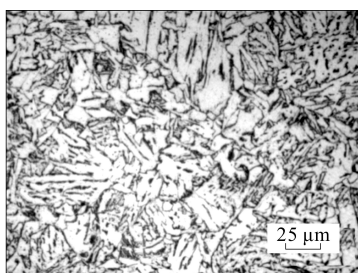


图 3 X60M 螺旋焊管焊缝外观形貌

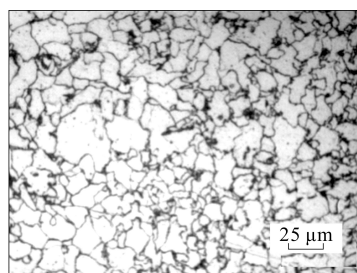
体，具有较明显的晶粒边界，细晶区组织为多边形铁素体+少量细小的 M/A 组元。



(a) 外焊缝



(b) 热影响区



(c) 内焊缝

图 4 X60M 螺旋焊管焊接接头金相组织

### 5.2 拉伸及导向弯曲性能

为了全面了解焊接接头性能指标是否能够满足标准及客户技术条件，分别对焊缝进行拉伸性能试验、导向弯曲性能试验。

(1) 拉伸试验：采用全壁厚矩形板状试样，横向试块 4 件，管母-2L、焊缝-2W，试样标距 50 mm，试样尺寸 9.53 mm $\times$ 38.1 mm $\times$ 300 mm，试验机型号为 WAW-1000 电液伺服万能试机，试验标准：

ASTM A 370—2019《钢制品力学性能试验的标准试验方法和定义》，试验结果见表 6。

(2) 导向弯曲试验：采用全壁厚矩形板状试样，焊缝为横向试块，焊缝-2W，中心在螺旋焊缝上，弯轴直径 48 mm，弯曲角度 180°，试样尺寸 9.53 mm $\times$ 38.1 mm $\times$ 300 mm，试验机型号为 WQ-200 液压式弯曲试验机，试验标准：ASTM A 370—2019，技术要求为不应完全断裂；在焊缝金属处

表6 X60M螺旋焊管焊接接头拉伸性能试验结果

项目	屈服强度 $R_{0.5}/\text{MPa}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	伸长率 $A_1/\%$	屈强比 $R_{0.5}/R_m$	结论	断裂位置
管母-1	443	570	38.0	0.78	合格	母材
管母-2	448	562	39.0	0.80	合格	
焊缝-1	-	565	-	-	合格	
焊缝-2	-	575	-	-	合格	
技术要求	415~565	520~760	$\geq 22$	$\leq 0.90^{\text{①}}$		

注：①允许其中5%的炉批屈强比 $\leq 0.92$ 。

不允许出现任何长度大于3.2 mm的裂纹或断裂，无论深度如何；在母材金属、热影响区或熔合线处不允许出现任何长度大于3.2 mm、深度大于规定壁厚的12.5%的裂纹；试验过程中试样边缘出现的裂纹，只要其长度不超过6.4 mm，不应成为拒收的理由。试验结果显示使用弯轴直径 $\leq 50$  mm，弯曲角度 $180^\circ$ 时正弯、反弯导向弯曲均合格。

### 5.3 夏比冲击韧性及落锤试验

在产品上分别截取母材、焊缝中心、热影响区的夏比冲击横向试样样坯，焊缝中心在螺旋焊缝

上，以获得焊接接头冲击韧性指标是否满足客户技术条件。

夏比冲击试样尺寸7.5 mm $\times$ 10 mm $\times$ 55 mm，V型缺口沿壁厚方向垂直焊缝表面，试验机型号为JBS-500型摆锤冲击试验机，试验标准：ASTM A 370—2019，试验结果见表7。

落锤撕裂试样尺寸9.53 mm $\times$ 75 mm $\times$ 300 mm，试验机型号为JL-50000型落锤撕裂试验机，试验标准：API RP 5L3—2014《管线管落锤撕裂试验》，试验结果见表8。

表7 7.5 mm $\times$ 10 mm $\times$ 55 mm试样焊接接头夏比冲击韧性试验结果

项目	试验温度/ $^\circ\text{C}$	冲击功/J				剪切面积百分比 SA/%				结论
		单值	平均值	单值	平均值	单值	平均值	单值	平均值	
管母	-20	305	312	329	315	91	93	93	92	合格
焊缝	-20	216	74	176	155	73	58	70	67	合格
热影响区	-20	207	214	200	207	85	87	82	85	合格
技术要求	-20	$\geq 38$		$\geq 53$	$\geq 80(30)^{\text{①}}$	$\geq 100(40)^{\text{①}}$				

注：①括号外是母材剪切面积，括号内是焊缝和热影响区的剪切面积。

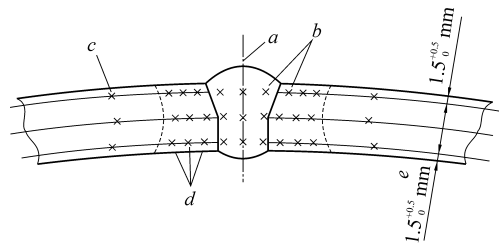
表8 9.53 mm $\times$ 75 mm $\times$ 300 mm试样落锤撕裂试验结果

项目	试验温度/ $^\circ\text{C}$	DWT 最小剪切面积百分比 SA/%		
		单值	平均值	单值
管母-1	0	95	96	95.5
管母-2	0	93	95	94
技术要求	0	$\geq 70$	$\geq 85$	

### 5.4 硬度试验

在产品上截取焊接接头全壁厚横截面试样，进行10 kG载荷维氏硬度试验，试验机型号为HVS-50硬度计，试验标准：ASTM E 92—2017《金属材料维氏硬度和努氏硬度的标准试验方法》，硬度打点位置如图5所示，试验结果见表9。

由表中数据可以看出，母材硬度值为187~212 HV10，平均值为194 HV10；焊缝硬度值为188~



a—焊缝中心线 b—距熔合线0.75 mm处  
c—距熔合线处 $1t$ ( $t$ 代表公称壁厚) d—可见热影响区  
e—距内外表面1.5 mm处

图5 焊缝硬度打点位置示意

206 HV10，平均值为198 HV10；热影响区硬度值为188~203 HV10，平均值为195 HV10，试验结果符合标准及客户技术要求。

表9 X60M螺旋焊管焊接接头硬度试验结果 HV10

母材	HAZ	焊缝	HAZ	母材	结论
201	203 188 196	210 206 205	201 189 201	198	
189	201 194 195	195 206 192	197 198 192	182	合格
187	192 197 203	190 195 188	191 197 189	200	
技术要求		≤265			

## 6 结论

通过对 X60M 低合金钢材料与 ER50-G 焊丝和纯 Ar 保护气体相匹配,对获得的焊接接头性能分析,工艺验证,提出了合理的操作方案及解决措施,并对焊接接头进行一系列的性能试验。试验结果表明:其各项指标均满足 GB/T 9711—2023 PSL2 标准及客户技术要求,获得良好的焊接接头,达到了预期效果。

### 参考文献

- [1] 王晓香. 焊接钢管技术的新进展[J]. 焊管, 2011, 34(3): 5-11.  
WANG Xiaoxiang. The new development of welded steel pipe technology[J]. Welded Pipe and Tube, 2011, 34(3): 5-11.
- [2] 邹尚利, 冯玉敏, 杜冬梅, 等. 单面焊双面焊成型技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.  
ZOU Shangli, FENG Yumin, DU Dongmei, et al. Crafts of welding by one side in shape by both sides[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [3] 王海生, 王庆国, 李建一, 等. 小规格埋弧焊钢管补焊工艺探讨[J]. 钢管, 2008, 37(3): 43-45.  
WANG Haisheng, WANG Qingguo, LI Jianyi, et al. Discussion on weld repair of small-sized SAW steel pipes[J]. Steel Pipe, 2008, 37(3): 43-45.
- [4] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 石油天然气工业 管线输送系统用钢管: GB/T 9711—2023[S]. 2023.  
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Petroleum and natural gas industries—steel pipe for pipeline transportation systems: GB/T 9711—2023[S]. 2023.
- [5] 陈祝年. 焊接工程师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.  
CHEN Zhunian. Handbook for welding engineer[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [6] 王洪光. 实用焊接工艺手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.  
WANG Hongguang. Practical welding process manual[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [7] 高慧临. 管线钢管与管线钢管[M]. 北京: 中国石化出版社, 2012.  
GAO Huilin. Pipeline steels&steel line pipes[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2012.
- [8] 毕宗岳. 管线钢管焊接技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.  
BI Zongyue. Welding technology for line pipe[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [9] 李萍萍. 浅谈单面焊双面成型焊接工艺[J]. 民营科技, 2014(7): 19.  
LI Pingping. A brief discussion on single sided welding and double sided forming welding process[J]. Private Technology, 2014(7): 19.
- [10] 荆学东, 尚久浩, 侯高强, 等. TIG 焊接中单面焊双面成型的研究[J]. 西北轻工业学院学报, 2000, 18(3): 66-69.  
JING Xuedong, SHANG Jiuhao, HOU Gaoqiang, et al. Study on melt-through bead in TIG welding[J]. Journal of Northwest Institute of Light Industry, 2000, 18(3): 66-69.
- [11] 王振华. 奥氏体 304 不锈钢钢管 A-TIG 焊接工艺研究[J]. 钢管, 2016, 45(5): 15-19.  
WANG Zhenhua. Research on A-TIG welding process for 304 austenitic stainless steel pipe[J]. Steel Pipe, 2016, 45(5): 15-19.

(收稿日期: 2023-10-11; 修定日期: 2024-04-16)