

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2022.11.15

LNG储罐9Ni钢环缝TT自动焊焊接工艺

郭 鹰, 杨尚玉, 周 聪, 阮见峰, 夏福龙

海洋石油工程股份有限公司, 天津 300461

摘 要: 基于LNG储罐内罐环缝全自动TT焊接系统,通过对不同壁厚的9Ni钢板进行环缝TT自动焊焊接试验,观察焊缝成形,并结合无损检测及理化性能试验,分析焊缝质量,总结出一套适合9Ni钢环缝焊接的TT全自动氩弧焊接工艺。根据试验研究发现,此TT工艺完全适用于9Ni钢板环缝焊接,且焊缝成形良好,接头性能优异,各指数都高于标准要求,可以有效提高LNG储罐内罐的焊接质量,大幅减少焊材消耗,并减少工作量,从而节约成本、控制质量。

关键词: LNG储罐; 9Ni钢; 环缝焊接; TT焊; 氩弧自动焊

中图分类号: TG457 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2022)11-0101-06

TT Automatic Welding Process for 9Ni Steel Girth Weld of LNG Tank

GUO Ying, YANG Shangyu, ZHOU Cong, RUAN Jianfeng, XIA Fulong

Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China

Abstract: Based on the automatic TT welding system for the girth weld of LNG storage tank, this paper conducted TT automatic welding test of 9Ni steel plates with different wall thicknesses, observe the weld formation, analyze the weld quality in combination with nondestructive testing and physical and chemical performance tests, and summarize the automatic TT welding process for the girth weld of 9Ni steel. According to the experimental research, this TT automatic welding process is fully applicable to the girth weld of 9Ni steel plate, and the weld formation is good, the joint performance is excellent, and each index is higher than the standard requirements. It can effectively improve the welding quality of LNG tank, greatly reduce the consumption of welding materials, and reduce the workload, so as to save costs and control quality.

Keywords: LNG tank; 9Ni steel; girth welding; TT welding; automatic GTAW

引用格式: 郭鹰, 杨尚玉, 周聪, 等. LNG储罐9Ni钢环缝TT自动焊焊接工艺[J]. 电焊机, 2022, 52(11): 101-106.

Citation: GUO Ying, YANG Shangyu, ZHOU Cong, et al. TT Automatic Welding Process for 9Ni Steel Girth Weld of LNG Tank[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(11): 101-106.

0 前言

液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)作为一种运用普遍、全天然的深冷液体燃料,在日常生活、发电及车用等诸多方面广泛涉及^[1]。伴随着国家能源政策的不断倾斜,LNG接收站储气设施的扩建步伐明显提速,LNG储罐是其中极为重要的一环。EN 10028 X7Ni9^[2]是一种适用于-196℃使用

的低碳调质钢,具有强度高、低温韧性好、热胀系数小、经济性较高等优点,目前国际上普遍采用其作为LNG内罐的建造材料^[3],其焊接工艺方法直接关系到LNG储罐的建造质量。

目前在LNG储罐内罐环缝自动焊接主要采用埋弧焊,存在几方面问题:盖面余高及清根打磨量大,焊材浪费严重^[4-6];粉尘噪声污染严重;需要碳弧气刨清根,由于操作工技能水平不一、刨削速度和

* 收稿日期: 2022-09-08

作者简介: 郭 鹰(1971—),男,硕士,高级工程师,主要从事焊接装备及工艺的研发工作。

碳棒送进速度不稳、压缩空气压力偏小、碳棒镀铜质量不好等因素影响,容易出现夹碳、粘渣、铜斑及渗碳等问题,影响焊缝的性能质量^[7-8]。

为了提高焊接施工质量,适应市场多样化需求,贯彻国家低碳环保、清洁能源理念,中海油自主研发了LNG储罐内罐环缝全自动TT焊接系统,并对9Ni钢板的环缝TT焊接工艺进行深入研究,开发出了一套LNG储罐内罐环缝TT全自动氩弧焊接工艺。应用此工艺完成的焊缝,其焊接接头性能完全符合标准设计要求,且更节省焊材。

1 焊接难点及解决措施

LNG储罐内罐环缝焊接长度约占整罐焊缝总长度的80%,焊接质量要求高,同时由于环缝焊接位置的的特殊性导致焊接成形困难,对焊接工艺的开发造成很大挑战。

(1)低温冲击韧性要求高。

LNG储罐内罐焊接要求焊接接头-196℃低温冲击功不低于70 J。焊接热输入、层间温度是影响低温韧性的主要因素。全自动TT环缝焊接系统采用TIP-TIG送丝技术,具有热丝和振动送丝功能,热丝有助于减少焊接热输入和提高焊接效率,振动送丝(振动频率20 Hz)有效地破坏熔滴和熔池的表面张力、细化晶粒、使裹挟在熔池中的气体及夹杂容易逸出,大幅度提高熔敷效率和熔池的冶金性能,提高焊缝冲击韧性。

(2)熔池受重力影响下坠。

在环缝焊接过程中,焊材及母材熔化后形成焊接熔池,熔池会在重力作用下自然下坠,容易造成焊缝上坡口熔合不良。全自动环缝TT焊接系统依靠钟摆系统(焊枪摆动角度可达30°),可以使钨针能量最集中的中心弧柱区到达坡口上侧壁,并且电弧在坡口两侧的停留时间可以分别设置,当熔池受重力影响产生下坠时,增大焊枪在上侧坡口的停留时间,使上侧坡口完全熔合,克服上侧坡口未熔合问题。

(3)焊接电弧磁偏吹问题。

9Ni钢对磁性极其敏感,焊接过程中由于焊接电流产生的工艺磁性很容易出现磁偏吹现象,导致

焊缝成形不良,影响焊接质量。经过反复试验验证发现,在环缝TT焊接过程中,焊接磁性最大的位置始终在焊接熔池前方约150 mm处,而且磁性最大位置会随着焊接的推移而向前迁移。由于储罐内罐环缝是一个首尾相接的大型圆柱形,磁性会随着焊接一直向前迁移,磁性最大处永远在熔池的前方,对焊接未造成明显影响。

2 试验材料及方法

(1)母材及焊材。

试验母材为国产X7Ni9钢板,尺寸1 000 mm×200 mm,壁厚15 mm和29.7 mm,模拟施工现场组对进行焊接试验。设备为TT环缝全自动氩弧焊接系统,采用直流正接模式。焊材选用直径1.0 mm的AWS A5.14 ERNiCrMo-4^[10]焊丝,牌号为OK Autrod NiCrMo-4。母材和焊丝成分如表1所示,力学性能如表2所示。

表1 母材和焊丝的化学成分(质量分数,%)

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

材料	C	Si	Mn	P	S
X7Ni9	0.05	0.19	0.6	0.003	0.002
OK Autrod NiCrMo-4	0.01	0.02	0.5	0.002	0.001

材料	Ni	Cr	Mo	W	Co	Fe
X7Ni9	8.7	—	—	—	—	其余
OK Autrod NiCrMo-4	54	16	17	4.4	1.9	5.1

表2 母材和焊丝的力学性能

Table 2 Mechanical properties of base metal and welding wire

材料	R_{el} /MPa	R_m /MPa	$A/\%$	冲击功 /J(-196℃)	侧向膨胀量 /mm
X7Ni9	720	730	21.8	140, 139, 143	1.55, 1.43, 1.6
ER NiCrMo-4	776	525	42.5	126, 120, 122	1.82, 1.72, 1.76

(2)保护气体。

保护气体(包括背保护气体)为纯度99.99%的Ar,保护气流量为15~20 L/min,打底焊和热道焊需要背部氩气保护,在热道焊接完成之后背部气体保护撤销。

(3)坡口设计。

坡口设计的原则是在保证焊缝成形质量的前提下,综合考虑环缝焊接位置特点、现场施工组对难度、焊材节约、提高施工效率等多方面因素。经

多次反复试验验证,最终确定采用上侧为双J型,下侧为平面的坡口设计,如图1所示,该坡口设计相比传统的60°X型坡口,焊接填充量减少50%以上。考虑到不同壁厚焊接时的工况,依据不同壁厚设计了不同的坡口。其中当壁厚 $t<20$ mm时,上侧J型坡口开口角度为15°;当壁厚 $t\geq 20$ mm时,上侧J型坡口开口角度为12°,坡口其余参数保持一致。

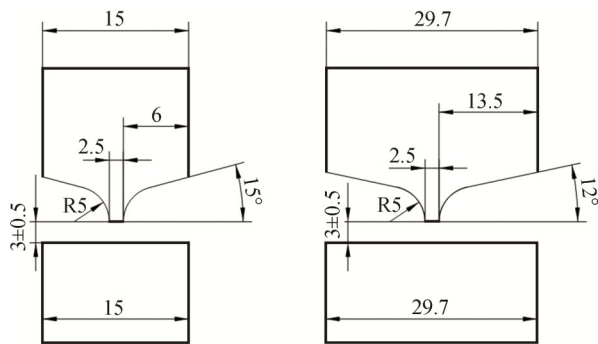


图1 坡口设计
Fig. 1 Groove design

(4)组对工艺。

由于现场大多是高空作业,需要在高空进行钢板组对,施工难度很高,全自动焊接系统工艺采用图1的坡口形式很大程度上降低了现场钢板组对的难度;经过大量试验验证,确定钢板组对间隙为 (3 ± 0.5) mm。以现场实际工况的钢板组对为例,组对前将坡口两侧25 mm范围内的铁锈和氧化皮等用砂轮机打磨光亮,露出金属光泽,并用酒精擦拭,去除油污。然后将3 mm的专用组对垫片放置在下侧钢板,即直坡口一侧,之后再将上侧钢板吊至对应位置,利用背杠进行固定,注意保持钢板的竖直度。

表3 9Ni钢环缝焊接工艺参数(壁厚15 mm)

Table 3 Circumferential weld welding process parameters of 9Ni steel (wall thickness 15 mm)						
焊道	电流/A	电压/V	送丝速度/(m·min ⁻¹)	焊接速度/(mm·min ⁻¹)	热输入/(kJ·mm ⁻¹)	摆速(°/s或mm/s)
打底	200±20	9~13	1.8~2.5	100±20	0.8~1.3	130
热道、填充	320±20	12~16	4.1~4.8	160	0.6~1.1	100
盖面	200±20	9~13	1.8~2.5	210±10	0.4~0.9	8(横摆)130(钟摆)

表4 9Ni钢环缝焊接工艺参数(壁厚29.7 mm)

Table 4 Table 3 Circumferential weld welding process parameters of 9Ni steel (wall thickness 29.7 mm)						
焊道	电流/A	电压/V	送丝速度/(m·min ⁻¹)	焊接速度/(mm·min ⁻¹)	热输入/(kJ·mm ⁻¹)	摆速(°/s或mm/s)
打底	300±20	12~16	2.5~3.1	100±20	1.0~1.5	130
热道	380±20	14~18	4.4~5.1	150	0.8~1.3	100
填充	400±20	15~19	5.4~6.1	160	0.8~1.3	100
盖面	200±20	9~13	1.8~2.5	210±10	0.4~0.9	8(横摆)130(钟摆)

固定好后对钢板坡口进行点焊,点焊间距为500~1 000 mm(根据钢板壁厚的不同确定,壁厚越厚,点焊间距越短,壁厚越薄,点焊间距越长),点焊长度50 mm。点焊后即完成了整个钢板的组对工作。

(5)预热和层间温度。

焊前无需预热,保证焊接环境温度不低于5℃即可,焊接过程中层间温度要求最高为100℃。现场LNG储罐建造时,X7Ni9钢板板幅大(一般长约12 m,宽约3.5 m),焊接时散热很快,层间温度几乎达不到100℃。

(6)焊接工艺参数。

TT环缝氩弧自动焊系统具有焊接参数实时采集、视频监控并存储功能,焊工可以在监控屏上清晰地看到焊接熔池状态,以及实时的电流电压、送丝速度和焊接速度等。根据熔池不同状态,及时调整钨针位置和微调焊接参数,获得理想的成形效果。待无损检测和性能检测结束后,结合检测结果,从而确定最优焊接工艺参数。根据前期试验和结果分析,适合壁厚15 mm、29.7 mm的最优焊接工艺参数如表3、表4所示。

3 结果分析

(1)无损检测。焊接完成24 h后对焊缝进行无损检测。目视检测(VT):焊缝表面均匀平整,呈银白色金属色泽,表面无咬边、气孔等缺陷(见图2)。渗透检测(PT):未发现裂纹等缺陷;射线检测(RT):射线底片焊道均匀、干净,熔合线边界整齐,未发现

气孔、夹渣和未熔透等焊接缺陷,满足 ISO 5817 中 B 级规范(见图3)。

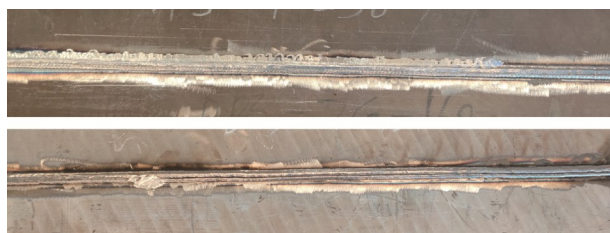


图2 焊缝表面成形

Fig. 2 Weld surface forming

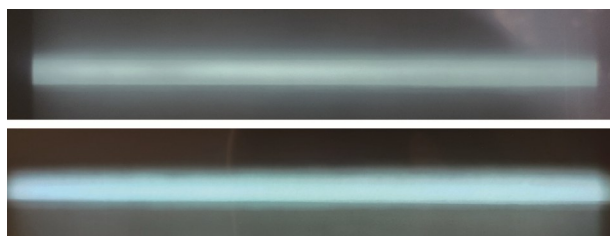


图3 射线检测底片

Fig. 3 Radiographic inspection film

(2)拉伸试验。依据标准 ISO 4136:2012,每块试板取两个试样(见图4),均在母材处韧性断裂,结果均满足要求(见表5)。结果表明,焊接接头处焊缝抗拉强度高于母材和焊接热影响区,拉伸性能满足验收要求。



(a)15 mm 试板

(b)29.7 mm 试板

图4 拉伸试样

Fig. 4 Tensile specimen

弯曲试验。依据标准 ISO 5173:2009 进行弯曲试验,弯曲角度为 180° ,弯心直径 40 mm,每块试板 4 个试样(见图5)。标准要求试样沿任何方向不得有大于 3 mm 的任何单一缺陷。弯曲试验结果如表 6 所示,弯曲试样未出现裂口,符合标准要求。

(3)冲击试验。分别在两块试板上的焊缝和热影响区取 3 件 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 55\text{ mm}$ 尺寸的试样进

表5 拉伸试验结果

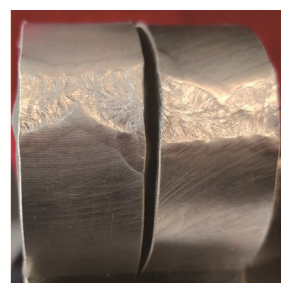
Table 5 Tensile test results

编号	壁厚 /mm	抗拉强度最 大载荷/N	抗拉强度 /MPa	断裂位置
A1	15	271 848	758	母材,韧性断裂
A2	15	272 040	762	母材,韧性断裂
A3	29.7	546 422	751	母材,韧性断裂
A4	29.7	546 826	752	母材,韧性断裂

注:标准要求试样抗拉强度 $\geq 690\text{ MPa}$ 。



(a)15 mm 试板



(b)29.7 mm 试板

图5 弯曲试样

Fig. 5 Bend specimen

表6 弯曲试验结果

Table 6 Bending test results

编号	壁厚 /mm	弯曲类型	弯曲角度 /($^\circ$)	弯心直径 /mm	检测结果
B1	15	侧弯	180	40	未发现缺陷
B2	15	侧弯	180	40	未发现缺陷
B3	15	侧弯	180	40	未发现缺陷
B4	15	侧弯	180	40	未发现缺陷
B5	29.7	侧弯	180	40	未发现缺陷
B6	29.7	侧弯	180	40	未发现缺陷
B7	29.7	侧弯	180	40	未发现缺陷
B8	29.7	侧弯	180	40	未发现缺陷

行 $-196\text{ }^\circ\text{C}$ 低温冲击试验。冲击试验结果见表 7,试样的低温冲击功和侧向膨胀量均满足标准要求。

(4)宏观金相。依据 ISO 17639:2013(E),每块试板取两个金相试样进行宏观金相检测。宏观金相照片如图 6 所示,焊缝完全熔合和焊透,未出现裂纹、气孔、夹渣或咬边等缺陷。

(5)微观组织。接头微观组织金相如图 7 所示,枝晶间距小,晶粒尺寸小,奥氏体含量大,故而焊缝延展性好,屈服强度大。

(6)硬度试验,依据 ISO 9015-1:2001 进行显微硬度试验,硬度试验点分布如图 8 所示,试验结果如表 8 所示。试块的维氏显微硬度均符合标准要求,试板硬度合格。

表 7 冲击试验结果
Table 7 Impact test results

编号	壁厚/mm	取样位置	冲击功 KV_2/J		侧膨胀量/mm		编号	壁厚/mm	取样位置	冲击功 KV_2/J		侧膨胀量/mm	
			单个值	平均值	单个值	平均值				单个值	平均值	单个值	平均值
C1	15	焊缝中心	152.3		1.89		C7	29.7	焊缝中心	136.5		1.90	
C2		焊缝中心	145.6	150.5	1.95	1.91	C8		焊缝中心	138.3	139.7	1.96	1.99
C3		焊缝中心	153.5		1.90		C9		焊缝中心	144.4		2.10	
C4		热影响区	164.0		2.03		C10		热影响区	227.6		2.22	
C5		热影响区	173.5	164.9	2.23	2.05	C11		热影响区	217.6	210.0	2.25	2.11
C6		热影响区	157.2		1.88		C12		热影响区	184.9		1.85	

注:标准要求3个标准试样冲击功平均值≥80 J,只允许一个测试组低于平均值,但不应小于56 J;每个试样的侧向膨胀量不应小于0.38 mm。

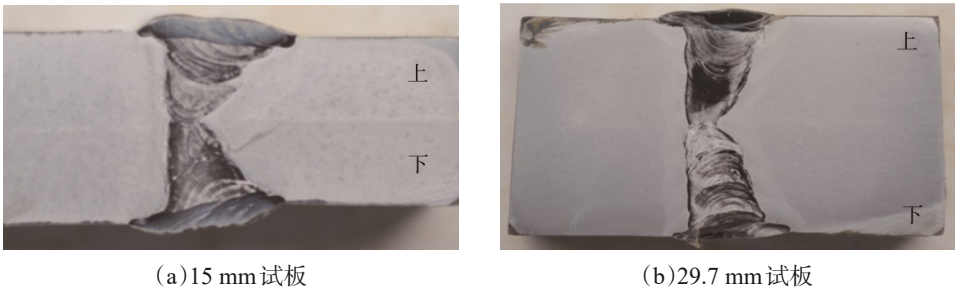


图 6 宏观金相照片
Fig. 6 Macro metallographic photos

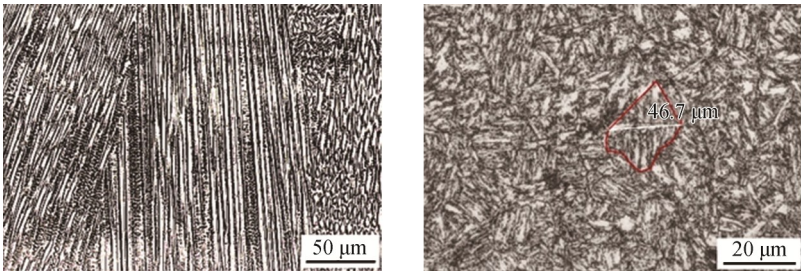


图 7 微观组织形貌
Fig. 7 Microstructure morphology

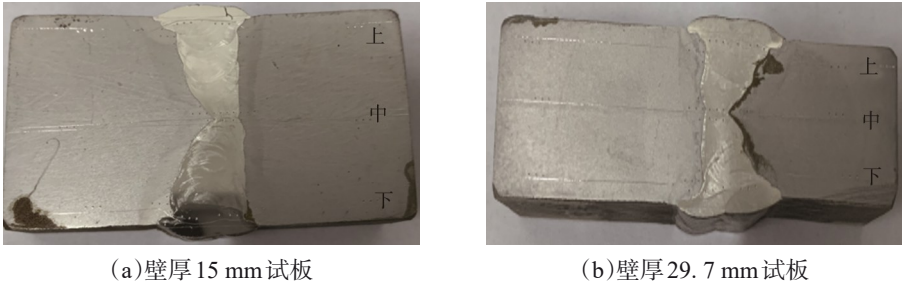


图 8 硬度试验后样品照片
Fig. 8 Photos of samples after hardness test

4 结论

(1)采用LNG储罐内罐环缝TT氩弧全自动焊接装备及焊接工艺系统可进行储罐环缝位置的

焊接。
(2)针对9Ni钢环缝焊接,采用TT自动焊焊接工艺焊接获得的焊接接头拉伸、弯曲、冲击、硬度、金相等性能优异,完全满足设计要求,尤其-196℃

表 8 硬度试验结果

Table 8 Hardness test results

编号	壁厚/mm	测试位置	母材/HV	热影响区/HV	焊缝/HV
D1	15	上	239,239,249	346,344,321,324,336	224,239,231
		中	234,244,241	288,283,255,261,292	222,227,238
		下	239,238,237	332,315,321,294,301	238,226,228
		测试位置	焊缝	热影响区	母材
		上	214,217,213	315,357,345,338,323	236,241,240
		中	237,227,232	289,319,263,327,288	247,246,242
		下	250,243,233	270,296,295,307,303	245,250,252
		测试位置	母材	热影响区	焊缝
		上	242,250,251	276,292,281,325,274	200,202,196
D2	29.7	中	246,236,240	249,337,276,287,339	211,205,200
		下	243,236,245	283,273,277,329,333	201,195,201
		测试位置	焊缝	热影响区	母材
		上	194,191,200	322,339,339,338,303	250,243,239
		中	209,201,206	283,268,283,286,289	236,244,257
		下	197,193,205	328,345,324,346,348	244,249,244

注:标准要求 ≤ 400 HV10。

低温冲击韧性约是标准要求的2倍以上。

(3)针对 LNG 储罐内罐 9Ni 钢环缝焊接,TT 全自动氩弧焊接工艺具有焊缝质量高、焊材消耗少、施工环境清洁等优点。

(4)目前单台设备的焊接效率较低,工程应用经验少。后续应继续探索工艺,改进设备,提高焊接效率,节省施工时间,并争取应用到更多的工程项目中,为全自动 TT 环缝自动焊的推广奠定基础。

参考文献:

- [1] 黄帆.我国液化天然气现状及发展前景分析[J].天然气技术,2007(1):68-71,92.
HUANG F. Analysis on Current Situation and Prospect of LNG in China [J]. Natural Gas Technology, 2007 (1):68-71,92.
- [2] EN 10028-4-2017, Flat products made of steels for pressure purposes-Part 4: Nickel alloy steels with specified low temperature properties[S].
- [3] 黄欢.液化天然气 9%Ni 钢内罐设计优化研究[J].石

油和化工设备,2021(24):34-36.

HUANG H. Study on Design Optimization of 9% Ni Steel Inner Tank for Liquefied Natural Gas[J]. Petro & Chemical Equipment, 2021(24):34-36.

- [4] 王晓磊,肖军.LNG 储罐 9%Ni 钢 GMAW-P 自动立焊接头组织与性能研究[J].电焊机,2021,51(11):106-109.

WANG X L, XIAO J. Study on microstructure and properties of 9%Ni steel GMAW-P automatic vertical welding joint for LNG storage tank [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(11):106-109.

- [5] 王毅敏.LNG 储罐 9Ni 钢埋弧自动横焊焊接工艺研究[J].金属加工:热加工,2018(5):62-65.

WANG Y M. SAW welding process of 9Ni steel in LNG storage tank[J]. MW Metal Forming, 2018(5): 62-65.

- [6] 杨国强.LNG 储罐焊接技术研究[J].装备制造技术,2015(8):198-199.

YANG G Q. Research on Welding Technology of LNG Storage Tank [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2015(8):198-199.

- [7] 韦宝成,杨尚玉,孙昕辉.LNG 储罐 9%Ni 钢立缝 SMAW 焊接质量安全健康隐患[J].电焊机,2020,50(3):110-117.

WEI B C, YANG S Y, SUN X H. Quality safety and health risks of 9%Ni steel vertical weld by SMAW for LNG tank[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(3): 110-117.

- [8] 韦宝成,杨尚玉,郭鹰.LNG 储罐 9%Ni 钢立缝全自动焊技术[J].电焊机,2020,50(06):113-116.

WEI B C, YANG S Y, GUO Y. Automatic welding technology of 9%Ni steel vertical weld in LNG tank [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(06):113-116.

- [9] 李连波,鲁欣豫,任胜汉,等.9%Ni 钢全自动 TT 立焊焊接工艺开发[J].电焊机,2017,47(10):116-118.

LI L B, LU X Y, REN S H, et al. Development of fully automatic TT vertical welding welding process for 9% Ni Steel [J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(10): 116-118.

- [10] AWS A5.14/A5.14M: 2018, Specification for Nickel and Nickel-Alloy Bare Welding Electrodes and Rods[S].

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>