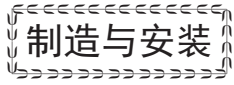


doi: 10.3969/j.issn.1001-4837.2025.09.010



窄间隙坡口智能热丝TIG焊在大型LNG储罐上应用研究

何铁伟¹, 李雪梅², 凌月关³

(1. 中国石油化工集团有限公司, 北京 100728; 2. 中石化第四建设有限公司, 天津 300270;

3. 荆门宏图特种飞行器制造有限公司, 湖北荆门 448100)

摘要:针对LNG储罐纵缝焊接中仍存在的焊条电弧焊效率低、作业环境差等问题,为实现高效、绿色、智能化的焊接制造,开发了一套窄间隙坡口智能热丝TIG焊系统。该系统通过搭载于轨道上的智能化焊接小车,沿06Ni9DR钢储罐壁板自动行走,集成了数字化高清熔池监控系统与内置焊接程序的智能焊接数据管理系统。结果表明,基于电弧跟踪技术,可实时识别焊缝位置并自适应调节工艺参数,焊缝成形良好,且接头在-196℃下表现出优异的低温冲击吸收能量、CTOD特征值与宽板拉伸平面应力断裂韧性。该技术已成功应用于22万m³LNG储罐工程,焊接一次合格率达99.44%,为LNG储罐焊接的智能化进程提供参考。

关键词:LNG储罐;06Ni9DR钢;纵缝;窄间隙坡口;智能热丝TIG焊

中图分类号:TH49;TG444.2;TE972.1

文献标志码:B

Application research of narrow-groove intelligent hot-wire TIG welding on large LNG storage tanks

HE Tiewei¹, LI Xuemei², LING Yueguan³

(1. China Petrochemical Corporation., Beijing 100728, China; 2. Sinopec Fourth Construction Co., Ltd., Tianjin 300270, China;

3. Jingmen Hongtu Special Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Jingmen 448100, China)

Abstract:To address the persistent issues of low efficiency and poor working environment in manual shielded metal arc welding for longitudinal seam welding, and to achieve efficient, green, and intelligent welding manufacturing, a narrow-groove intelligent hot-wire TIG welding system was developed. The system, carried by an intelligent welding trolley on a track, moves automatically along the wall plates of 06Ni9DR steel storage tanks. It integrates a digital high-definition molten pool monitoring system and an intelligent welding data management system with built-in welding procedures. The results show that based on arc tracking technology, the system can identify weld seam positions in real time and adaptively adjust process parameters, resulting in well-formed welds. Moreover, the joints exhibit excellent low-temperature impact absorbed energy, CTOD characteristic values, and wide-plate tensile plane stress fracture toughness at -196℃. This technology has been successfully applied to a 220 000 m³ LNG storage tank project, achieving a first-pass welding qualification rate of 99.44%, providing a reference for the intelligentization of LNG storage tank welding.

Key words:LNG storage tank; 06Ni9DR steel; longitudinal seam; narrow-groove; intelligent hot-wire TIG welding

0 引言

目前我国06Ni9DR钢制LNG储罐的容积正从16万m³逐渐向27万m³过渡。容积增大有助于降低工程造价,但最大壁厚也从16万m³时的

28.5 mm增加至27万m³时的37 mm。06Ni9DR钢具有良好的低温韧性和焊接性,在长期低温条件下仍能保持结构稳定,同时具备较低的冷收缩率和磁导率^[1]。然而,由于其组织为低碳回火马氏体,晶粒各向异性较明显,易被磁化,焊接时易引

起磁偏吹现象。

以22万 m^3 储罐为例,其内罐直径约86 m,罐壁高度约42 m,焊缝总长度约4 500 m。目前我国大型LNG储罐壁板普遍采用正装法施工^[2]。其中,纵缝焊接仍采用焊条电弧焊,该方法效率低、劳动强度大,且焊工为追求熔敷效率常采用较大热输入,导致接头低温韧性下降。此外,在密闭空间内施焊时,焊条发尘量大,作业环境恶劣,对焊工身心健康造成较大影响。

针对储罐壁板纵缝焊接需求,本文提出一套窄间隙坡口智能热丝TIG焊系统。鉴于储罐壁板高度较大,系统采用分体式布局,将焊接小车、控制机箱与焊接电源等核心部件独立布设,并实现50 m范围内的稳定信息传输。该系统集成电弧跟踪技术,可实现钨极的精准自动对中,有效削弱磁偏吹的干扰作用,同时支持焊接工艺参数的远程调控。文中重点阐述该智能热丝TIG焊系统的整体构成,并对其焊接接头的各项力学性能开展系统检测。依据相关标准,对焊接接头进行 $-196\text{ }^\circ\text{C}$ 宽板拉伸试验,以期为LNG储罐焊接智能化技术的发展提供理论与实践参考。

1 06Ni9DR钢制LNG储罐焊接特点

1.1 06Ni9DR钢的特点

大型LNG储罐的内罐普遍采用调质高强度06Ni9DR进行制造。该材料的淬火温度为 $790\sim 850\text{ }^\circ\text{C}$,回火温度为 $540\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$,抗拉强度 R_m 为 $680\sim 790\text{ MPa}$, $-196\text{ }^\circ\text{C}$ 下的 KV_2 冲击功不低于 $100\text{ J}^{[3]}$ 。其组织以低碳回火马氏体为主,产生冷

表1 针对06Ni9DR钢焊接接头及全焊缝金属拉伸试样力学性能的相关要求

Tab.1 Relevant requirements for mechanical properties of welded joints and all-weld metal tensile specimens of 06Ni9DR steel

参数	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$KV_2(-196\text{ }^\circ\text{C})/\text{J}$	$LE(-196\text{ }^\circ\text{C})/\text{mm}$	弯曲($D=4a$)/($^\circ$)	δ_m/mm	硬度/HV10	NDTT/ $^\circ\text{C}$
数值	≥ 400	≥ 650	≥ 70	≥ 0.53	180	≥ 0.30	≤ 360	≤ -196

1.3 06Ni9DR钢制LNG储罐焊接工艺评定要求

LNG储罐的许用应力依据焊缝金属屈服强度除以安全系数进行计算。因此,在进行焊接工艺评定时,除需按NB/T 47014—2023《承压设备焊接工艺评定》标准制取焊接接头的板形拉伸试样外,还应按GB/T 2652—2022《金属材料焊缝破坏性试验 熔化焊接头焊缝金属纵向拉伸试验》沿焊缝长度方向制取全焊缝金属圆棒拉伸试样,并测定其 $R_{p0.2}$ 值^[7]。06Ni9DR钢的焊接类似于异种钢焊接,镍基焊材中的Mo, Cr, W, Co, Nb等强度型合金元素经母材稀释后,导致全焊缝金属的抗拉

裂纹的倾向较小。然而,由于马氏体板条具有磁各向异性,材料易被磁化,焊接时易产生电弧磁偏吹,通常要求母材剩磁量控制在50 G以内^[4]。此外,该钢对焊接热输入较为敏感,随着热输入增大,焊接接头的低温冲击韧性会出现明显下降。

06Ni9DR钢若采用铁基焊材焊接,在熔合线区域易形成马氏体组织,因此须选用镍基合金焊材^[5]。然而,镍基焊材在焊接时液态金属流动性较差,熔深较浅,如图1所示^[6]。该材料不宜通过增大电流来提高熔深,且镍基焊材熔敷金属的熔点较母材低约 $100\text{ }^\circ\text{C}$,焊接过程中易产生未熔合缺陷。

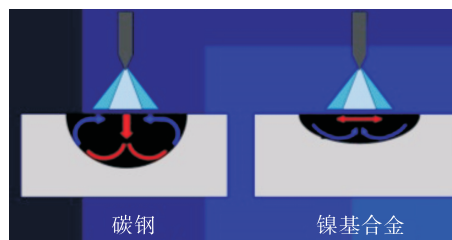


图1 碳钢和镍基合金焊接熔池熔深对比

Fig.1 Comparison of weld pool penetration between carbon steel and nickel-based alloy

1.2 06Ni9DR钢焊接接头的特点

06Ni9DR钢焊缝金属中Ni含量较高,易与杂质元素P、S结合形成低熔共晶体,在焊缝金属凝固过程中易产生热裂纹,尤其易出现收弧裂纹。因此收弧时应填满弧坑,且在打底焊过程中需注意对弧坑处进行及时修磨。此外,焊接时熔池铁水黏度较大,仰焊位置气体不易逸出,容易在焊缝金属中形成气孔缺陷。该钢制LNG储罐焊接接头的力学性能等相关技术要求见表1。

强度低于母材及熔敷金属。NB/T 47014—2023标准规定,焊接接头的抗拉强度应不低于设计要求的全焊缝金属抗拉强度650 MPa。然而,目前许多设计文件仍规定“焊接接头抗拉强度不低于母材680 MPa,且当拉伸试样断裂于焊缝时需进行全焊缝金属拉伸试验”。

06Ni9DR钢由于焊缝金属的屈服强度显著低于母材,在进行焊接接头侧弯试验时,弯曲载荷主要作用于焊缝金属,母材难以产生相应变形,容易在焊缝金属或熔合线区域发生开裂^[8]。因此,建议进行纵向面弯与背弯试验。

2 窄间隙坡口智能热丝TIG焊系统

窄间隙坡口智能热丝TIG焊装备系统示意图如图2(a)所示,主要包括导轨、龙门架、升降平台、焊接设备系统、供气系统及智能化配套装置等部分。由于06Ni9DR钢对磁场较为敏感,智能热丝TIG焊焊接小车架于半柔性、锯齿状轨道上行走,轨道通过真空吸盘吸附于母材表面,以避免对钢板产生磁化影响,见图2(b)。热丝TIG焊焊枪在深坡口或窄坡口条件下采用角摆方式,浅坡口时采用平摆方式;焊接过程中可根据坡口形态调整焊枪摆动方式,以保证坡口侧壁熔合质量与焊缝表面成形,见图2(c)。

该系统配置协同脉冲与脉动送丝两种模式,二者可任意切换。坡口较窄时使用脉动送丝模式,坡口较宽时则采用协同脉冲模式。焊丝在进入熔池前被加热至约 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$,热丝对熔池的搅拌作用增强,有助于降低焊接热输入并提高焊接效

率。脉动送丝可减小熔滴过渡时的表面张力,提高过渡频率,其搅拌作用也使焊缝金属成分更均匀、晶粒更细小^[9]。配套的TSD脉动热丝系统送丝速度可达 15 m/min ,提高了熔敷速度。钨极与工件距离保持恒定,确保电弧电压稳定、焊道成形良好、弧长较短,在一定程度上可抑制电弧磁偏吹。机头搭载跟踪系统,可自动识别焊道中心位置,确保焊接过程不偏离。手持遥控编程器可控制小车行走速度、机头摆动方式与角度、坡口两侧驻足时间等参数,焊接参数可分段设置并自动切换,适应各类复杂工况。

系统还配备数字化高清熔池监控系统与智能化焊接数据管理系统。焊工可通过监控系统实时观察焊接过程,并在现场办公室远程调节相关参数,显著降低劳动强度,见图2(d)。对于局部组对精度不足的部位,焊工可现场微调摆动机构,适当降低焊接速度并增加焊枪在坡口两侧的停留时间,实现实时纠偏,避免产生未熔合等缺陷。

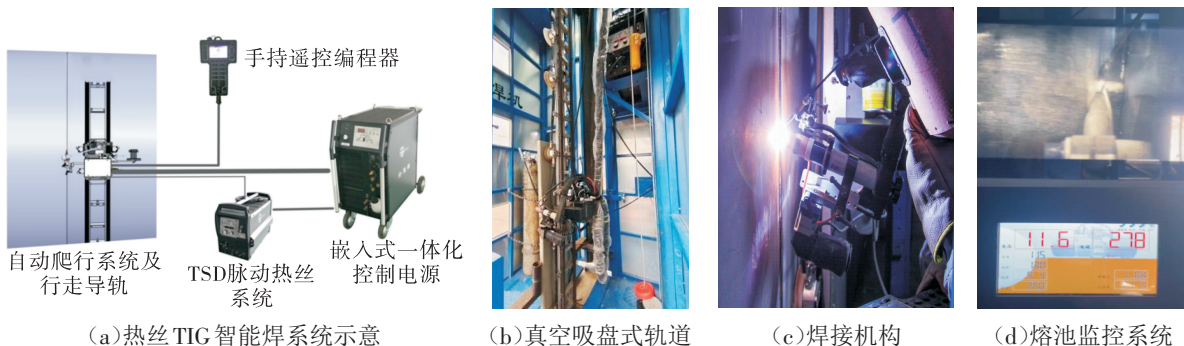


图2 智能热丝TIG焊系统

Fig.2 Intelligent hot-wire TIG welding system

3 智能热丝TIG焊窄间隙坡口形式

智能热丝TIG焊将储罐原本采用的焊条电弧焊 60°V 形宽坡口改为 8°U 形窄间隙坡口。其中,厚度小于 15 mm 的板材采用单U坡口形式,如图3(a)所示;厚度在 15 mm 及以上的板材采用双U形坡口形式,如图3(b)所示。在 22万 m^3 储罐的焊接中,采用窄间隙智能热丝TIG焊相比传统焊条电弧焊,焊接工作量减少约30%以上。

4 纵缝窄间隙坡口智能热丝TIG焊焊接材料及焊接工艺

窄间隙坡口智能热丝TIG焊试验选用美国林肯公司提供的 $\varnothing 1.0\text{ mm}$ ERNiCrMo-4焊丝,保护气体为99.999%高纯氩气。

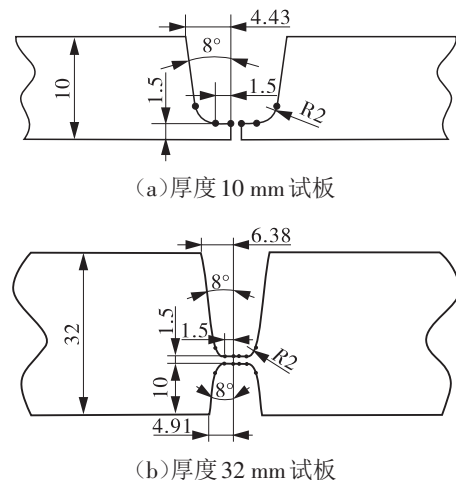


图3 智能热丝TIG窄间隙坡口示意

Fig.3 Schematic of narrow-groove for intelligent hot-wire TIG welding

试验在立焊位置进行,试板厚度分别为10, 16, 18, 21, 24, 26, 32 mm。焊接设备采用安意源T400嵌入式一体化控制电源,焊接环境为室温,相对湿度约80%。焊接参数如下:焊接电流220~280 A,电弧电压10~13 V,焊接热输入控制在23 kJ/cm以下。每层焊缝金属厚度不超过3 mm,宽度小于12 mm。正面保护气体流量为12~15 L/min,背面保护气体流量为8~12 L/min,道间温度控制在100℃以下。

焊接过程采用自动控制连续施焊,焊工通过熔池监控系统观察熔池状态。各焊道收弧位置相互错开约20 mm。焊接过程中无需进行层间清理,最终焊道亦无需打磨处理。坡口两侧熔合良好,无飞溅,电弧燃烧稳定。焊缝表面与母材过渡平顺,无咬边现象,鱼鳞纹排列规整,余高适中,外观成形优良,如图4所示。



图4 窄坡口智能热丝TIG焊焊缝成形

Fig.4 Weld formation in narrow-groove intelligent hot-wire TIG welding

5 焊接接头力学性能等试验

所有试板焊后经X射线检测,结果均符合NB/T 47013.2—2015《承压设备无损检测 第2部分:射线检测》I级要求。按GB/T 2652—2022标准在焊缝截面中心位置制取 $\varnothing 5$ mm全焊缝金属试样,其屈服强度测试结果如图5所示,分布于625~854 MPa之间。

依据NB/T 47014—2023标准,制备了7种规格的焊接接头板形拉伸试样,试验结果如图6所示,焊接接头抗拉强度范围为709~761 MPa。对厚度为10, 16, 18, 21, 24, 26 mm的试板,在表面下2 mm处制取冲击试样;32 mm试板在1/4厚度处制取冲击试样。试验结果如图7、图8所示,焊接接头在-196℃下的KV₂冲击功为135~272 J,侧向膨胀量为0.7~2.1 mm。

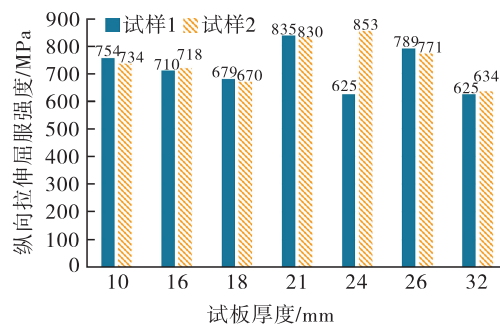


图5 热丝TIG焊全焊缝金属屈服强度

Fig.5 Yield strength of all-weld metal in hot-wire TIG welding

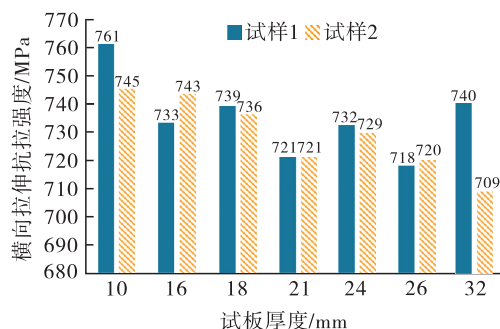


图6 焊接接头抗拉强度

Fig.6 Tensile strength of welded joint

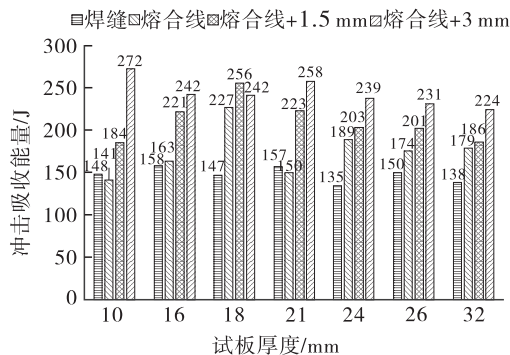


图7 焊接接头低温冲击吸收能量

Fig.7 Low-temperature impact absorbed energy of welded joint

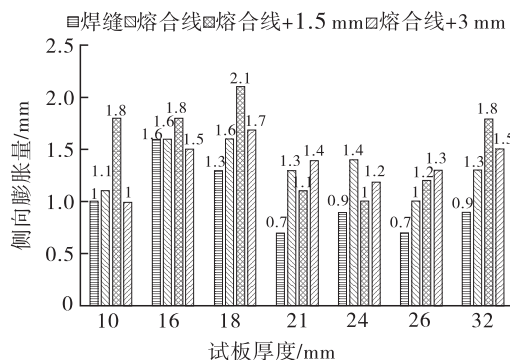


图8 焊接接头侧向膨胀量

Fig.8 Lateral expansion of welded joint

按NB/T 47014—2023标准制备面弯与背弯试样,弯曲试验后均未出现裂纹。根据

GB/T 2654—2022 标准对 32 mm 厚焊接接头表面下 2 mm 处进行硬度测试,结果如图 9 所示,焊接接头最高硬度位于热影响区,为 340HV10。

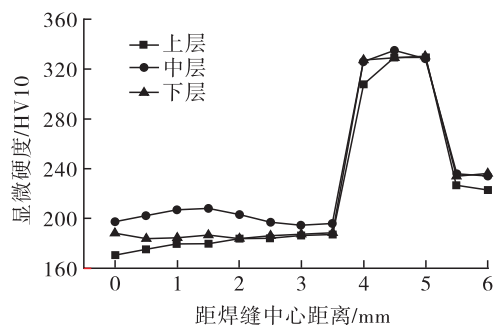


图9 32 mm 厚焊接接头硬度

Fig.9 Hardness of 32 mm thick welded joint

裂纹尖端张开位移(CTOD)试验采用三点弯曲试样,其尺寸、制备、加工及试验方法均按 GB/T 21143—2014《金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法》执行。所有试样经线切割并预制疲劳裂纹长度约 20 mm。焊缝金属与热影响区在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的 CTOD 特征值分别为 0.793, 0.896 mm^[10](见表 2)。按 GB/T 6803—2023《铁素体钢的无塑性转变温度落锤试验方法》制取 P2 试样,垂直于焊缝方向取样,裂纹源缺口开设于焊缝金属位置。落锤试验结果如表 3 所示,其中 W 为焊缝金属;H 为热影响区。结果表明,无塑性转变温度(NDTT)低于 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。上述试验结果表明,焊接接头的各项性能均满足表 1 所列技术要求。

表 2 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下焊接接头 CTOD 试验结果

Tab.2 CTOD test results of welded joint at $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$

试样编号	a_0/mm	F/kN	V_p/mm	CTOD 值/mm
W1	27.53	98.96	1.45	0.560
W2	29.40	93.82	2.72	0.877
W3	27.64	107.25	2.66	0.943
H1	27.40	102.85	1.86	0.694
H2	28.10	99.74	2.90	0.974
H3	27.15	110.31	2.86	1.021

表 3 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下焊缝金属落锤试验结果

Tab.3 Drop weight test results of weld metal at $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$

焊接材料	试验位置	试验结果	NDTT/ $^{\circ}\text{C}$
ERNiCrMo-4	焊缝金属	未断裂	<-196

6 焊接接头宏观、微观金相

针对 32 mm 厚板材的窄间隙坡口智能热丝 TIG 焊,由于焊接总热输入较低,焊缝金属的柱状晶组织较为细小,且孢状树枝晶分布均匀。焊缝

金属组织为奥氏体,如图 10(a)所示;热影响区组织为板条状回火马氏体,如图 10(b)所示。由于智能热丝 TIG 焊热输入较小,实测热影响区宽度仅为 2 mm,其中粗晶区宽度约为 0.3 mm,这与图 7 中热影响区表现出的良好低温冲击韧性相符。



(a) 焊缝金属



(b) 热影响区

图 10 焊接接头金相组织

Fig.10 Microstructure of welded joint

7 06Ni9DR 钢热丝智能 TIG 焊宽板拉伸试验

针对立焊位置 32 mm 厚的 06Ni9DR 钢智能热丝 TIG 焊接接头,参照企业标准 Q/725—1182—2005《宽板拉伸断裂试验方法》,进行了 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 宽板拉伸试验。该试验旨在测定焊接接头宽板试样在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的拉伸载荷与断裂应力,以评估采用现场焊接工艺制备的宽板试样在预定工作温度、工作应力及实际结构条件下的断裂行为^[11]。

宽板拉伸试样的几何形状与尺寸如图 11 所示。试样两端 80 mm 长的细长缺口采用直径不大于 0.2 mm 的钼丝线切割加工,以保证缺口最大宽度不超过 0.25 mm。

首先使用 ENiCrMo-6 焊条将试样焊接至试样夹头上。试验在 10 000 kN 宽板拉伸试验机上进行,试验机测力传感器及相关仪器的显示误差小于 1%,试样加载速率控制在 90~140 kN/s。

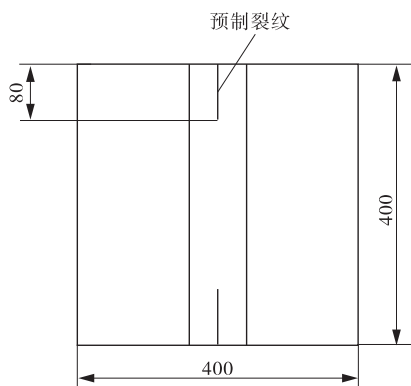


图 11 宽板拉伸试样

Fig.11 Wide plate tensile specimen

试样置于 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液氮冷却槽中,保温至少30 min后,逐步加载直至断裂。断裂后的试样形貌如图12所示,表明试样在断裂前已发生明显塑性变形。试验结果见表4,显示焊接接头具有较好的平面应力断裂韧性。这表明智能热丝TIG焊接接头在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温环境下,即使焊缝金属中存在尖锐缺口,仍可避免低应力脆性断裂的发生。

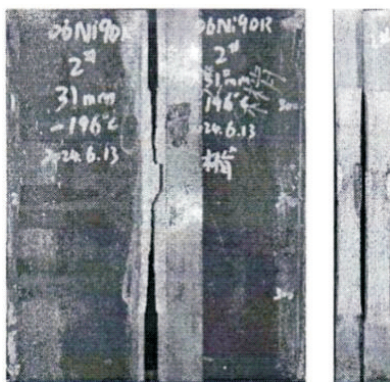


图 12 宽板拉伸试验后的试样

Fig.12 Specimen after wide plate tensile test

表4 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下宽板拉伸试验结果Tab.4 Wide plate tensile test results at $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$

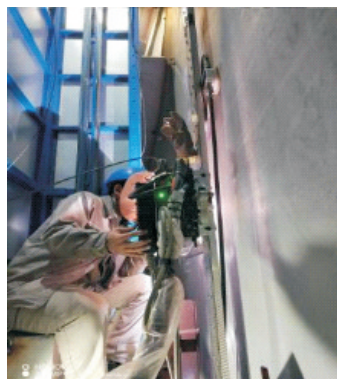
参数	断裂载荷/ kN	名义断裂 应力/MPa	净断应力/ MPa	K_{IC} / ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)
数值	7 220.0	597.2	1 012.3	336.2

8 工程应用

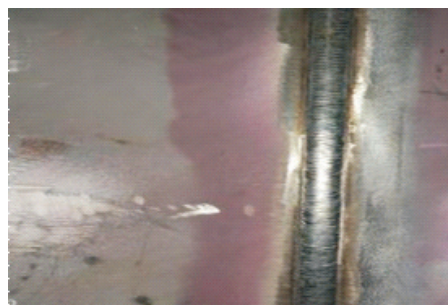
窄间隙坡口智能热丝TIG焊系统已成功应用于某LNG项目22万 m^3 LNG储罐的建造,如图13(a)所示。焊接一次合格率达99.44%,且焊缝外观质量良好,如图13(b)所示。该工艺实现了道间免打磨,显著改善了现场作业环境。

以22万 m^3 LNG储罐第三圈壁板为例,若采用焊条电弧焊(SMAW),单道焊缝焊接时间约需

9~10 h;而采用窄间隙坡口智能热丝TIG焊,仅需5~6 h,工效约为SMAW的2倍。然而,在实际施焊过程中也发现若干需注意的问题:(1)在极少数位置,母材剩磁量达到100~200 G,出现了磁偏吹现象,其中打底层和首层填充焊缝尤为明显,在发生磁偏吹的部位,常伴随出现未熔合缺陷,施焊过程中通常可通过加设背板以缓解磁偏吹的影响;(2)在热丝智能TIG焊过程中,受环境等因素影响,焊缝中偶尔出现少量气孔缺陷。但经NB/T 47013.2—2015标准射线检测(RT),结果符合II级要求。后续施焊时需加强对电弧的保护,若氩气瓶距离焊接位置较远,应采取相应措施以稳定氩气流量。



(a)智能热丝TIG施焊现场



(b)焊缝正面

图 13 智能热丝TIG焊现场应用

Fig.13 On-site application of intelligent hot-wire TIG welding

9 结论

(1)窄间隙坡口智能热丝TIG焊系统设计先进、结构合理。该系统采用真空吸附式半柔性轨道,避免了对06Ni9DR钢板的磁化影响。焊接小车搭载电弧跟踪技术,并配置数字化高清熔池监控系统及内置焊接程序的智能化焊接数据管理系统,可自动识别坡口并实时调节工艺参数,实现焊缝表面美观成形。

(2)采用热丝TIG智能焊焊接06Ni9DR钢纵缝时,其热影响区较窄,焊接接头晶粒度细小。焊缝金属在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的 KV_2 冲击功可达120 J以上;焊缝金属与热影响区在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的CTOD特征值分别为0.793 mm和0.896 mm;焊缝金属的NDTT值低于 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。焊接接头最高硬度为340HV10,该值虽略高,但仍低于标准技术要求的上限。

(3)窄间隙坡口智能热丝TIG焊接接头宽板拉伸试验模拟了实际焊接结构的断裂行为,其 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 平面应力断裂韧性 K_{IC} 高达 $336.2\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。结果表明,即使焊缝金属中存在尖锐缺口,仍可避免发生低应力脆性断裂。

(4)窄间隙坡口智能热丝TIG焊已成功应用于 22万 m^3 LNG储罐纵缝焊接,焊接一次合格率达99.44%,焊接效率约为SMAW的2倍。该工艺改善了储罐内密闭空间的施焊环境,有效降低了焊工的劳动强度,实现了高效、绿色的焊接作业。

参考文献:

- [1] 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(2):34-36.
HUANG H.A Study on design optimization of 9% Ni steel inner tank for liquefied natural gas [J]. Petro & Chemical Equipment, 2021, 24(2): 34-36.
- [2] 王凯锋,刘春.LNG储罐内罐06Ni9DR钢板预制及安装控制[J].化学工程与装备,2018(7):91-94.
WANG K F, LIU C. Prefabrication and installation control of 06Ni9DR steel plate for inner tank of LNG storage tank [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2018(7): 91-94.
- [3] 马向峰,陈永东,解朝晖.LNG储罐用06Ni9钢板的质量控制[J].压力容器,2011,28(7):40-44.
MA X F, CHEN Y D, XIE Z H. Quality control of 06Ni9 steel plate for LNG storage tank [J]. Pressure Vessel Technology, 2011, 28(7): 40-44.
- [4] 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(8):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(8): 110-117.
- [5] 王庆江,胡鹏亮,郑庆铭,等.LNG储罐用ENiCrMo-6型焊条的国产化研制[J].电焊机,2023,53(1):112-117.
WANG Q J, HU P L, ZHENG Q M, et al. Domestic development of ENiCrMo-6 electrode for LNG storage tank [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(1): 112-117.
- [6] 翁大龙,张胜男,唐元生,等.LNG大型储罐9%Ni钢罐壁立缝GMAW-P机动焊工艺研究及应用探讨[J].石油化工设备技术,2018,39(5):63-66.
WENG D L, ZHANG S N, TANG Y S, et al. Study on the technology and application of vertical GMAW-P machine welding in large LNG tank with 9% Ni steel tank wall [J]. Petrochemical Equipment Technology, 2018, 39(5): 63-66.
- [7] 李宏斌.大型LNG储罐用9%Ni钢的焊接工艺评定[J].石油化工设备技术,2015,36(5):65-66.
LI H B. Welding procedure qualification of 9% Nickel steel for large LNG storage tank [J]. Petrochemical Equipment Technology, 2015, 36(5): 65-66.
- [8] 李冬毓,王嘉睿,孙万田.LNG储罐用钢06Ni9DR焊接接头弯曲试验断裂失效分析[J].压力容器,2023,40(8):74-78.
LI D Y, WANG J R, SUN W T. Fracture failure analysis of 06Ni9DR steel welded joint for LNG storage tank in bending test [J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(8): 74-78.
- [9] 郭鹰,杨尚玉,周聪,等.LNG储罐用9Ni钢 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 焊缝断裂韧性及断口分析[J].压力容器,2022,39(11):9-15.
GUO Y, YANG S Y, ZHOU C, et al. Fracture toughness and fracture analysis of 9Ni steel weld at $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ for LNG storage tank [J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(11): 9-15.
- [10] 房务农,蒋军,郭广飞,等.大型LNG储罐三种高效自动化焊接工艺对比研究[J].压力容器,2024,41(1):25-32.
FANG W N, JIANG J, GUO G F, et al. Comparative study on three efficient automatic welding processes for large LNG storage tanks [J]. Pressure Vessel Technology, 2024, 41(1): 25-32.
- [11] 朱林,凌纯,刘刚.10MnNiCrMoV钢宽板拉伸试验研究[J].材料开发与应用,2009,24(6):6-9.
ZHU L, LING C, LIU G. Wide plate tensile test of 10MnNiCrMoV steel [J]. Development and Application of Materials, 2009, 24(6): 6-9.

作者简介:何铁伟(1976),男,高级工程师,主要从事油气与新能源工程技术及项目实施管理方向的工作,通信地址:100728北京市朝阳门北大街22号中国石化大厦工程部的E-mail:hetiewei@sinopec.com。

本文引用格式:

何铁伟,李雪梅,凌月关.窄间隙坡口智能热丝TIG焊在大型LNG储罐上应用研究[J].压力容器,2025,42(9):80-86.
HE Tiewei, LI Xuemei, LING Yueguan. Application research of narrow-groove intelligent hot-wire TIG welding on large LNG storage tanks [J]. Pressure Vessel Technology, 2025, 42(9): 80-86.