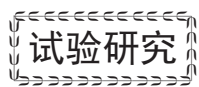


doi: 10.3969/j.issn.1001-4837.2025.01.001



TT自动焊在X7Ni9钢制LNG储罐内罐环焊缝焊接上的应用研究

周 聪, 路兴才, 赵龙一, 湛 康

(国家管网集团工程技术创新有限公司, 天津 300450)

摘 要:为提高LNG储罐内罐环焊缝焊接质量,对LNG储罐内罐X7Ni9钢环缝TT焊接工艺展开研究,采用双J型窄坡口设计与单面焊双面成型技术,揭示TT自动焊接头低温韧性优良的机理。使用光学显微镜和扫描电镜对焊接接头进行金相组织观察,并对焊接接头进行了无损检测和拉伸、弯曲、冲击、硬度、CTOD及XRD测试。结果表明:焊缝成型良好且性能优良,抗拉强度均值为743 MPa,弯曲试验证明焊缝无缺陷。在-196 °C温度下,上表面焊缝冲击韧性均值为152.1 J,侧向膨胀量均值为1.82 mm;根部焊缝冲击韧性均值为164.2 J,侧向膨胀量均值为1.58 mm;上表面热影响区冲击韧性均值为233.1 J,侧向膨胀量均值为2.05 mm;根部热影响区冲击韧性均值为175.3 J,侧向膨胀量均值为1.71 mm。焊缝CTOD值为0.465 mm,热影响区CTOD值为0.734 mm,具有良好的低温韧性,其原因是焊缝组织以奥氏体为主,晶粒细小,组织纯净,逆转奥氏体含量高。研究开发的TT自动焊工艺用于LNG储罐环缝焊接,实现了工程示范应用,为下一步推广应用提供支撑。

关键词: LNG储罐; TT焊; 组织性能; 低温韧性

中图分类号: TH49; TE972; TG146.15

文献标志码: A

Application of TT automatic welding in circumferential seam welding of X7Ni9 steel LNG storage tank inner vessels

ZHOU Cong, LU Xingcai, ZHAO Longyi, SHEN Kang

(PipeChina Engineering Technology Innovation Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: To improve the welding quality of circumferential seams in LNG storage tank inner vessels, this study focuses on the tandem TIG welding process for X7Ni9 steel circumferential seams. A double-J narrow groove design and single-sided welding with double-sided formation technology were applied to investigate the mechanism behind the excellent cryogenic toughness of tandem TIG welded joints. Microstructure analysis was performed using optical microscopy and scanning electron microscopy. Non-destructive testing and mechanical evaluations, including tensile, bending, impact, hardness, crack tip opening displacement, and X-ray diffraction tests, were conducted. Results showed that the welds exhibited excellent formation and performance. The average tensile strength reached 743 MPa, and bending tests confirmed defect-free welds. At the temperature of -196 °C, the impact toughness values were 152.1 J for the upper weld surface with a lateral expansion of 1.82 mm, 164.2 J for the root weld with 1.58 mm lateral expansion, 233.1 J for the upper heat-affected zone with 2.05 mm lateral expansion, and 175.3 J for the root heat-affected zone with 1.71 mm lateral expansion. The crack tip opening displacement values were 0.465 mm for the weld and 0.734 mm for the heat-affected zone, demonstrating outstanding cryogenic toughness. This is attributed to the fine-grained austenitic microstructure, high purity, and abundant reversed austenite content in the weld. The developed tandem TIG welding process has been successfully applied in engineering demonstrations, providing a foundation for its broader use in LNG storage tank manufacturing.

Key words: LNG storage tank; tandem TIG (TT) welding; microstructure and properties; cryogenic toughness

收稿日期: 2024-11-15 修回日期: 2025-01-07

基金项目: 国家管网集团课题(GWHT20220034157BG1)

0 引言

2021年,我国提出了“碳达峰、碳中和”目标,2024年8月11日,中共中央国务院下发关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见,明确提出以“碳达峰、碳中和”工作为引领,加快经济社会发展全面绿色转型。在当前能源转型背景下,尽管氢能与液氨等新型清洁能源尚未形成规模化应用体系,我国仍积极推进低碳能源结构调整。相较于传统化石能源,天然气虽属清洁能源范畴,但受限于“富煤缺油少气”的资源特征,我国仍然依赖进口石油、天然气。目前,我国氢能和液氨等清洁能源还不具备大规模应用的条件。1体积的液化天然气的燃烧值相当于气态天然气的625倍^[1],在此背景下,液化天然气(Liquefied natural gas, LNG)储罐作为关键储运设施,其技术发展具有重要战略意义。我国自2003年首次建造16万m³LNG储罐以来,随着建造技术的进步和9Ni钢材性能的不不断提升,逐渐向22万m³、27万m³大型储罐过渡,容积率增大,降低了相应的造价^[2-4]。据统计,截止到2023年底,我国已建LNG储罐接收站28个,年接收能力超过1.23亿吨。典型LNG储罐由外罐、保冷层和内罐组成^[5],9Ni钢因其在-196℃下良好的低温韧性,成为了LNG储罐内罐建设的理想材料^[6-9]。

在当前LNG储罐建造技术体系中,9Ni钢焊接质量直接决定着储罐在超低温工况下的结构完整性与运营安全性。由于焊接缺陷引发的热影响区脆性断裂可导致储罐泄漏,造成重大经济损失,这使得焊接工艺选择成为工程控制的核心环节。目前,内罐9Ni钢环缝多采用埋弧焊工艺,立缝、底板和大角焊缝多采用焊条电弧焊工艺。韦宝成等^[10-11]将TT焊用于LNG储罐内罐9Ni钢立缝焊接,焊接质量优良,施工效率高,可应用于工程实践。此外,一些研究人员将激光焊应用于9Ni钢焊接,采用窄间隙坡口,具有焊接效率高、节约焊材、焊接质量好等优点^[12-13]。肖操等^[14]通过对埋弧焊设备和工艺进行升级优化,将埋弧焊用于LNG储罐内罐底环板、加强筋角缝及T形大角缝内侧焊接,焊缝成型良好。国际前沿的激光-电弧复合焊技术虽能使焊缝成型良好^[15],但热影响区硬度偏高,不符合BS EN ISO 15614标准要求,暴露出工艺适配性缺陷。尽管一些实验室已掌握多种焊接工艺类型,但工程实际应用率偏低。随

着智能化水平的提高,LNG储罐内罐9Ni钢实现手工焊-半自动焊-全自动焊转变是必然趋势。开发TT自动焊用于LNG储罐内罐9Ni钢环缝焊接,对于提高焊接质量和安全性,推动LNG储罐内罐智能化焊接具有重要意义。

目前,国内外LNG储罐内罐环缝焊接均采用埋弧焊技术(SAW),具有施工效率高、设备系统简单及焊接技术成熟等优点。然而工程实践表明,传统V/X形坡口设计导致单道焊缝填充量高,需配合碳弧气刨清根及砂轮打磨,使得材料损耗率偏高,施工成本增加。因此,本文引入TT自动焊代替埋弧焊,用于LNG储罐内罐9Ni钢环缝施工,提高施工质量,降低施工成本,减少环境污染,并实现了工程示范应用;对接头组织性能进行了研究,阐明了TT自动焊低温韧性优良的原因,为下一步大规模推广应用提供支撑。

1 试验方法

1.1 全自动TT焊接工艺

奥地利Ms.Siegfried Plasch在TIG焊的基础上发明了振动自动送丝的热丝TIG焊技术。全自动TIP-TIG焊(简称TT焊)在TIG焊的基础上进行改进,使用了原TIG焊的电源,将人工送丝改为机械的抽拉式振动送丝;并添加了热丝系统,通过热丝源把即将送进熔池端的焊丝加热到预定温度,增大了熔敷量,同时提高焊接效率^[16]。TT焊热输入小,且振动送丝对熔池有搅拌作用,能有效提高焊接质量^[10],实现单面焊双面成型,无需清根、打磨。本工艺主要优势如下。

(1)采用双J型窄坡口设计,与传统埋弧焊相比,节省了至少30%的焊材。

(2)采用振动送丝技术,实现针对熔池的搅拌功能,有效破坏了熔滴和熔池的表面张力,细化晶粒,抑制熔池中的气体逸出,大幅度提高熔敷效率和焊缝冶金性能,降低热输入,可获得性能优异的焊接接头。

(3)采用钟摆+横摆焊技术,钨针与坡口侧壁形成大夹角,改善了坡口侧壁的受热状态,有效解决窄坡口焊接易产生侧壁未熔的行业难题。

(4)采用电弧跟踪技术,提高焊接质量,降低焊工工作强度,如图1所示。由于大型LNG储罐中钢板环缝长度约为12m,焊接过程仍需要焊工进行焊接位置的纠偏、对中及调整电弧高度等工作,容易视觉疲劳,造成焊接质量的波动。AVC

控制系统能够根据电弧高度和坡口宽度方向自动调整,大幅减少人工干预,提高焊接质量。

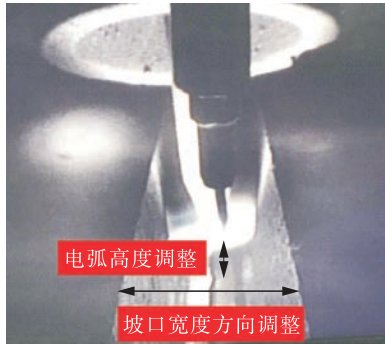


图1 焊缝跟踪示意

Fig.1 Schematic diagram of weld seam tracking

(5)采用复合气罩双路气体保护,焊接接头质量成型好,质量高。

整套自动TT焊设备结构如图2所示,主要由米勒Dynasty 800交直流两用焊接电源、TT送丝热丝一体机、焊接机头、机械臂、控制及软件系统和视频监控系统等组成。焊接行走系统与机械系统的一体化设计,在保证机械结构的刚度与强度的同时,实现精准的焊接速度、电弧稳定性调控。无

轨道焊接能够维持长时间连续焊接,综合焊接施工效率高,操作便捷。

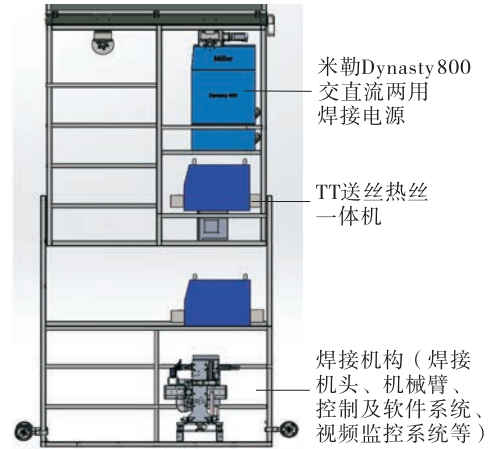


图2 自动TT焊设备

Fig.2 Schematic diagram of TT automatic welding platform

1.2 试验材料及方法

试验用钢板为某公司生产的X7Ni9钢材料,板厚为22.5 mm,其化学成分与力学性能见表1。焊丝采用ERNiCrMo-4材料,直径为1.0 mm,其化学成分与力学性能见表2。

表1 X7Ni9钢化学成分及力学性能

Tab.1 Chemical composition and mechanical properties of X7Ni9 steel

化学成分/%												力学性能		
C	Mn	P	Si	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	Fe	其余	R_{eL}/MPa	R_m/MPa	$-196\text{ }^\circ\text{C}$ 夏比冲击功 A_{kv}/J
0.05	0.6	0.003	0.19	0.002	0.02	8.7	0.02	0.003	0.003	其余		694	730	253

表2 焊材化学成分和力学性能

Tab.2 Chemical composition and mechanical properties of welding materials

化学成分/%								力学性能		
C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	R_{eL}/MPa	R_m/MPa	$-196\text{ }^\circ\text{C}$ 夏比冲击功 A_{kv}/J
0.005	0.53	0.07	<0.005	<0.001	59.23	15.33	15.42	456	713	122

焊缝坡口为单边双J型窄坡口,坡口宽度为8~10 mm,如图3所示。埋弧焊坡口形式如图4所

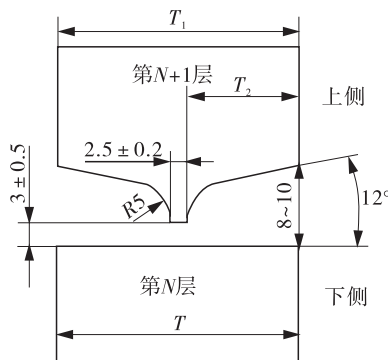


图3 TT焊坡口

Fig.3 TT welding groove

示,坡口宽度分别为7.5~9.5 mm,16.6~18.6 mm。焊接工艺参数见表3。

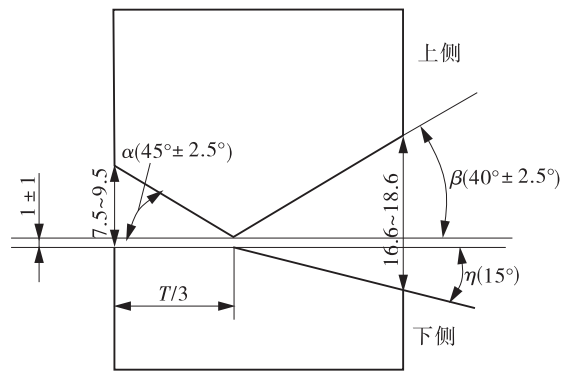


图4 埋弧焊坡口

Fig.4 Submerged arc welding groove

表3 焊接工艺参数

Tab.3 Welding process parameters

焊道	电流/A	电压/V	焊速/ (mm·min ⁻¹)	热输入/ (kJ·mm ⁻¹)
打底	230~250	13~14	80~100	1.0~1.1
热焊	250~280	13~14	150~160	1.0~1.1
填充	300~320	15~16	180~200	1.2~1.3
盖面	180~200	10~11	200~220	0.9~1.1

与埋弧焊相比,TT焊可减少坡口加工时间,同时窄坡口设计可节约焊材30%以上。TT焊工艺采用纯度为99.99%液氩保护气,气体流量15~20 L/min。

1.3 焊缝成型及X射线探伤

图5、图6分别示出焊缝成型和焊接接头的宏观形貌。可以看出,焊缝成型良好,无表面未熔合、裂纹、孔洞、未焊透及咬边等缺陷。焊缝宽度分别为14.18,10.51 mm,最大焊缝余高1.60 mm。

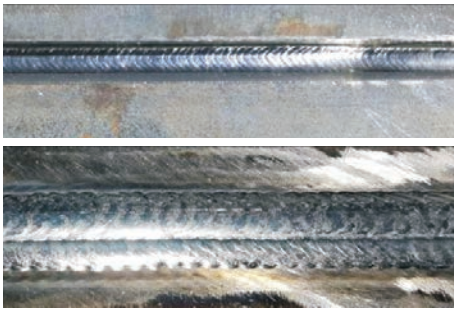


图5 焊缝成型

Fig.5 Weld formation



图6 焊接接头宏观形貌

Fig.6 Macromorphology of welded joints

X射线探伤检测结果如图7所示,焊接接头无气孔、裂纹、和未熔合等缺陷。

2 试验结果及分析

2.1 焊接接头拉伸试验

拉伸试验结果如表4所示,断裂位置均位于母材,无宏观缺陷,如图8所示,抗拉强度大于EN ISO 4136标准要求的690 MPa。

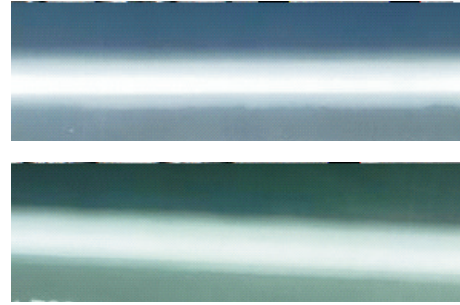


图7 X射线探伤结果

Fig.7 X-ray inspection results

表4 拉伸试验结果

Tab.4 Tensile test results

编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断裂位置
1	519	745	母材
2	513	743	母材
3	505	730	母材
4	522	754	母材

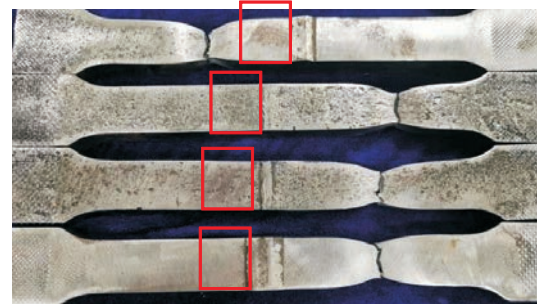


图8 拉伸后试件

Fig.8 Test specimen after stretching

2.2 焊接接头弯曲试验

采用全板厚侧弯试验,弯曲直径 $4a$,弯曲角度 180° 。从图9可以看出,经 180° 弯曲后试样表面无裂纹出现,焊接接头具有良好的塑性性能。



图9 弯曲试样宏观形貌

Fig.9 Macro-morphology of bending specimen

2.3 焊接接头硬度试验

图10示出硬度测试点位置。选择试件的上中下3个位置,中部焊缝位置区域小,仅能取3个点。焊接接头硬度值如图11所示,其中, Ac_1 为加热时珠光体向奥氏体转变的开始温度, Ac_3 为加

热时铁素体完全转变为奥氏体时的终了温度。硬度总体呈现热影响区>母材>焊缝的趋势,主要原因是热影响区在热循环温度 A_{c3} 和 A_{c1} 范围内发生再结晶,焊接接头冷却速度较快,奥氏体转变为马氏体;粗晶区形成粗大马氏体组织,使得热影响区的硬度明显比焊缝金属和母材高。

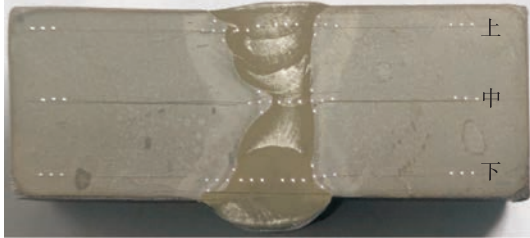


图10 硬度测试点位置

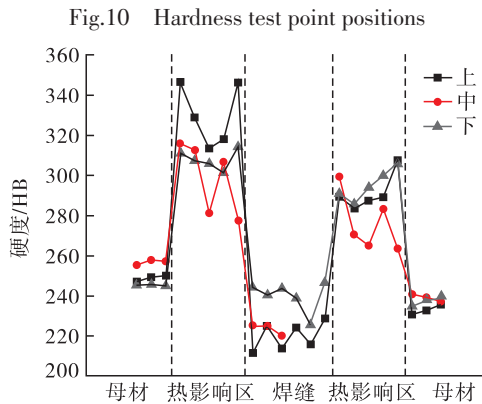


图11 焊接接头硬度值

Fig.11 Hardness values of welded joints

2.4 焊接接头低温冲击性能

冲击试验结果如表5所示,冲击后试样宏观形貌如图12所示。由表5可知,焊接接头冲击功均较高,平均低温冲击功为181.2 J,是EN ISO 9016标准要求的两倍以上;平均侧向膨胀量为1.79 mm,焊接接头具有良好的低温韧性。满足

EN ISO 9016标准要求的3个标准试样冲击功平均值 ≥ 70 J,只允许1个测试值低于平均值但不应小于56 J,每个试样的侧向膨胀量不小于0.38 mm,焊接接头热影响区的低温冲击功整体高于焊缝区。

表5 焊接接头冲击试验结果(试验温度 -196 °C)

Tab.5 Impact test results of welded joints at -196 °C

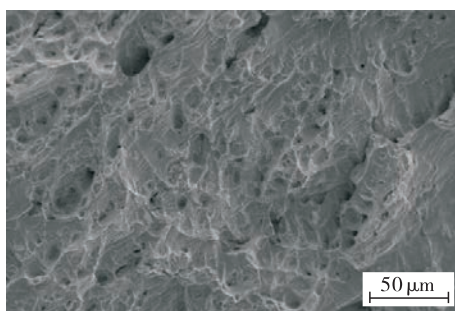
编号	取样位置	冲击功/J	侧向膨胀量/mm
1	上表面焊缝	152.4	1.70
2	上表面焊缝	147.5	1.85
3	上表面焊缝	156.4	1.92
4	上表面热影响区	245.2	2.14
5	上表面热影响区	223.7	1.94
6	上表面热影响区	230.5	2.07
7	根部焊缝	164.8	1.56
8	根部焊缝	160.4	1.39
9	根部焊缝	167.3	1.80
10	根部热影响区	169.2	1.60
11	根部热影响区	183.1	1.81
12	根部热影响区	173.5	1.73



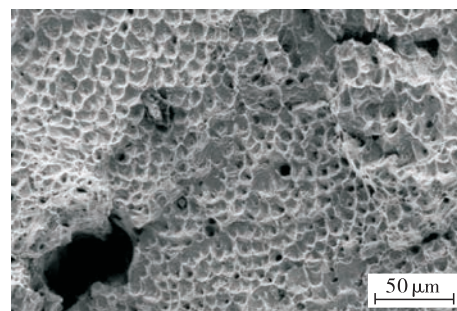
图12 冲击试样宏观形貌

Fig.12 Macromorphology of impact test specimen

图13示出冲击试样断口的微观结构。从断口形貌图中可以看出,TT焊缝中心冲击断口处有少量韧窝,韧窝少而浅,出现准解理花样,二次裂纹处有撕裂的痕迹;热影响区冲击断口出现比较密集的等轴韧窝,为韧性断裂,二次裂纹处同样出现撕裂的现象。



(a) 焊缝中心



(b) 热影响区

图13 TT冲击断口微观形貌

Fig.13 Micromorphology of TT impact fracture

2.5 裂纹尖端张开位移试验

裂纹尖端张开位移 (Crack tip opening

displacement,CTOD)最早由WELLS提出^[17],本试验采用 $W=B$ 取样方式, $F-V$ 曲线如图14所示。

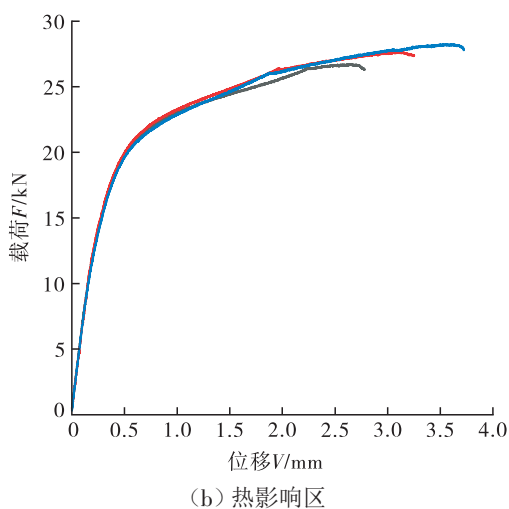
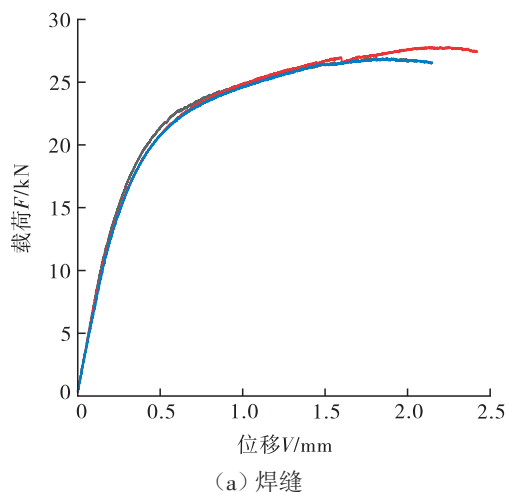
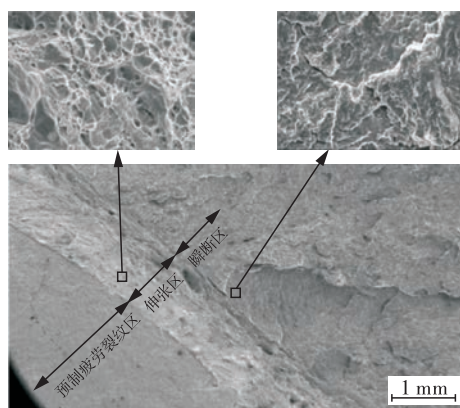
图 14 $F-V$ 曲线Fig.14 $F-V$ curve

图 15 焊缝 CTOD 断口形貌

Fig.15 Weld CTOD fracture morphology

试验结果表明,焊缝区 CTOD 值为 0.465 mm,热影响区 CTOD 值为 0.734 mm,塑性变形能力好,有更好的抗裂性能。图 15 示出焊缝处 CTOD 试样断口形貌,整个断口的预制疲劳裂纹区、伸张区和瞬断区分界线明显。伸张区呈现韧窝状,是典型

的韧性断裂,瞬断区高度不均匀,非解理断裂与脆性断裂,说明焊接接头在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温下具有良好的韧性。

2.6 焊接接头低温韧性研究

2.6.1 组织分析

使用光学显微镜对焊缝组织进行观察,焊缝区金相组织如图 16 所示。

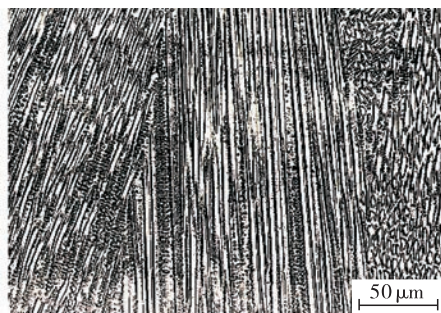


图 16 焊缝区组织

Fig.16 Microstructure of welded zone

焊缝区组织由奥氏体+析出相组成,结晶形态为树枝晶,枝晶宽度为 $10.8\text{ }\mu\text{m}$,间距为 $11.3\text{ }\mu\text{m}$,具有方向性特征。白色区域为枝干,枝间为残留金属,其余颜色较深的区域为一次结晶后的析出相。TT 焊热输入量小,焊接过程稳定,焊缝成型好,一次枝晶间距较小,焊缝晶粒尺寸小,组织以奥氏体为主,铁素体含量低,因此接头低温韧性较高。图 17 示出焊缝金属 SEM 微观形貌。由图 17(a)(b)可知,焊缝金属的析出相均位于胞状晶和胞状树枝晶晶间。析出相放大图如图 17(c)所示,图中析出物呈白色块状和点状,以块状居多,晶粒尺寸在 $0.5\sim 1.2\text{ }\mu\text{m}$ 之间。焊缝组织均匀纯净,焊缝金属析出物数量较少且尺寸较小,从而保证焊缝具有良好的低温韧性。

热影响区的粗晶区是焊接接头性能薄弱区,对 TT 焊接接头粗晶区进行观察,如图 18 所示。与传统埋弧焊(粗晶区尺寸约为 $55\text{ }\mu\text{m}$)和焊条电弧焊(粗晶区尺寸约为 $70\text{ }\mu\text{m}$)接头粗晶区晶粒相比,TT 焊接接头热影响区粗晶区晶粒细小。由于焊接热输入小,焊接过程中抽拉送丝及摆动,剧烈地振动搅拌熔池,使得接头组织晶粒细小。采用 Hall-Petch 关系式^[18]进行分析,其计算式如下:

$$\sigma_s = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (1)$$

式中, σ_s 为屈服强度, MPa; σ_0 为材料相关常数, MPa; k 为常数, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$; d 为晶粒的平均直径, μm 。

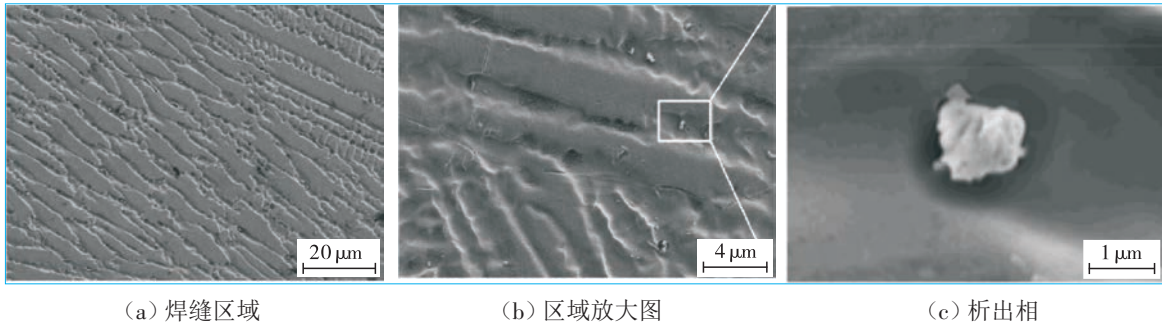


图17 不同倍数下焊缝SEM微观形貌

Fig.17 SEM microstructure of weld seam under different multiples

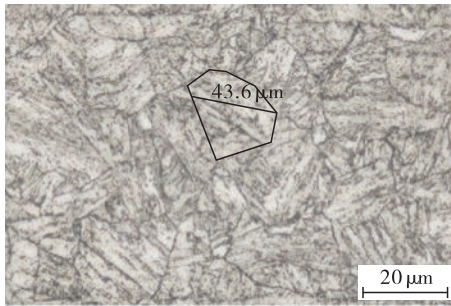


图18 热影响区粗晶区组织

Fig.18 Microstructure of coarse grain zone in heat-affected zone

由式(1)可知,在相同体积内,晶粒尺寸越小,晶粒数量越多,在相同条件下,可承受塑性变形的晶粒也就越多,塑性变形能力越好。同时晶粒尺寸越小,晶界越多,裂纹扩展的阻力越多,可承受塑性变形的程度越大。TT焊接头焊缝和热影响区晶粒细小,是导致接头强度高、低温韧性好的另一个原因。

2.6.2 X射线衍射分析

通过D8 Advabce X射线衍射仪对热影响区的组织结构以及逆转奥氏体含量进行了检测。母材和焊缝取样位置见图19。试样经机械磨抛后,以扫描范围为 $10^{\circ}\sim 90^{\circ}$,扫描速度为 $1(^{\circ})/\text{min}$,步长 0.01° ,以铜靶为靶材进行检测。

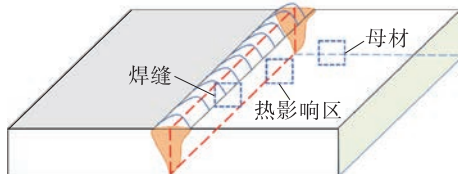


图19 X射线衍射取样位置

Fig.19 X-ray diffraction sampling positions

逆转奥氏体具有较高的低温稳定性,对X7Ni9钢的低温韧性有较大影响。XRD测量X7Ni9奥氏体含量的公式为^[19]:

$$V_A = (1 - V_C) / \left(1 + G \frac{I_{M(hkl)_i}}{I_{A(hkl)_j}} \right) \quad (2)$$

式中, V_A 为钢中奥氏体相的体积分数; V_C 为钢中碳化物总量的体积分数; G 为奥氏体 $(hkl)_j$ 晶面与马氏体 $(hkl)_i$ 晶面对应的强度有关因子之比,是 $G_{M(hkl)_i}^{A(hkl)_j}$ 的缩写; $I_{M(hkl)_i}$ 为钢中马氏体 $(hkl)_i$ 晶面衍射线的累计强度; $I_{A(hkl)_j}$ 为钢中奥氏体 $(hkl)_j$ 晶面衍射线的累计强度。

$$G = \frac{V_M}{V_A} \times \frac{P_{A(hkl)_j}}{P_{M(hkl)_i}} \times \frac{(L \cdot P)_{A(hkl)_j}}{(L \cdot P)_{M(hkl)_i}} \times \frac{e^{-2M}}{e^M} \times \frac{|F|_{A(hkl)_j}^2}{|F|_{M(hkl)_i}^2} \quad (3)$$

式中, V 为单位包晶体积; M 为马氏体相; A 为奥氏体相; $(L \cdot P)$ 为洛伦兹-偏振因子; P 为有关晶面的多重性因子; e^{-2M} 为德拜-瓦洛温度因子; $|F|^2$ 为结构因子。

逆转奥氏体相体积分数的计算过程如下。

(1)分别计算马氏体相、奥氏体相中各衍射线间的累计强度比值。

$$\frac{I_{M(200)}}{I_{A(200)}}, \frac{I_{M(220)}}{I_{A(220)}}, \frac{I_{M(311)}}{I_{A(311)}}, \frac{I_{M(211)}}{I_{A(200)}}, \frac{I_{M(211)}}{I_{A(220)}}, \frac{I_{M(211)}}{I_{A(311)}}$$

(2)不同衍射对 G 值(见表6)。

表6 不同衍射对 G 值Tab.6 Different diffraction to G values

马氏体	奥氏体		
	(200)	(220)	(311)
(200)	2.46	1.32	1.78
(211)	1.21	0.65	0.87

(3) V_A 值计算。

将6个独立测量值求和后取算术平均值,此值即为逆转奥氏体相的体积分数。

图20示出母材及焊缝的XRD测试结果。由图20(a)可以看出,母材组织主要由低碳马氏体

和少量的奥氏体构成,奥氏体的衍射峰不明显,通过(200)(220)和(311)峰值强度,由式(2)(3)计算得到逆转奥氏体体积分数约为8%。这种逆转奥氏体高度富集C, Ni, Mn等合金元素。在 A_{c1} 温度以下,淬火形成的高浓度马氏体在回火时,溶质原子经短距离扩散偏聚在原奥氏体边界形成具有高稳定奥氏体。当材料发生塑性变形时,裂纹尖端的应力集中引起马氏体相变,从而产生应力松弛,阻碍裂纹扩展,提高钢韧性和强度,对9Ni钢的低温韧性性能优化有着重要作用。由图20(b)可以看出,焊缝区组织主要是奥氏体,可以保证焊缝区具有良好的低温韧性。

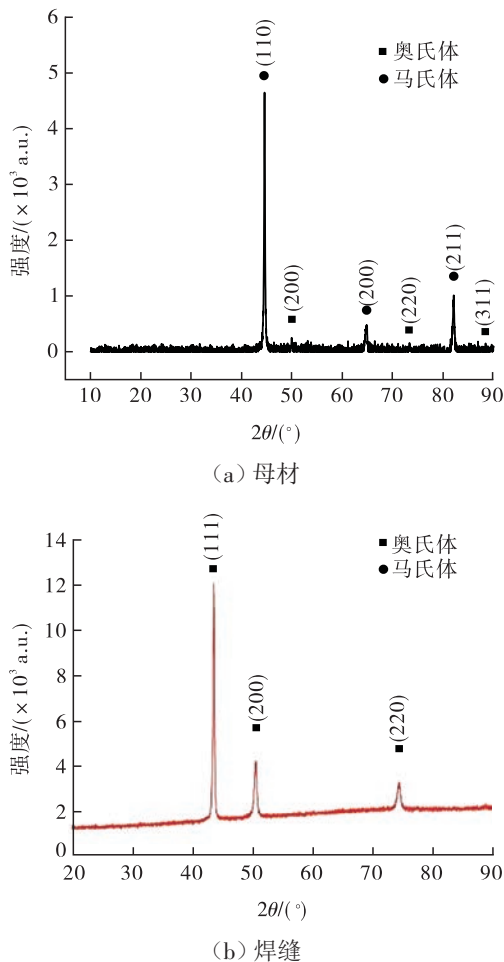


图20 母材及焊缝的XRD测试结果

Fig.20 XRD results of base metal and weld metal

3 工程示范应用

TT自动焊技术用于LNG储罐内罐X7Ni9钢环缝焊接已在某公司LNG工程项目中示范应用,共计完成4道焊口焊接,无损检测焊接一次合格率100%,全部为一级片,工程示范应用现场如

图21所示。

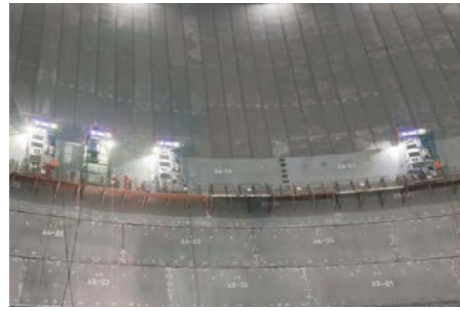


图21 工程示范应用现场

Fig.21 Engineering demonstration application site

4 结论

(1)TT焊接接头熔合比小,铁素体含量少;奥氏体含量高,晶粒细小及焊缝组织均匀纯净是TT焊接接头低温韧性优良的主要原因。

(2)焊接接头具有优异的性能,尤其是 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温夏比冲击功达到设计值两倍以上,满足LNG储罐的制造要求。

(3)TT自动焊工艺可用于LNG储罐内罐X7Ni9钢环缝焊接,实现了单面焊双面成型,并进行了工程示范应用。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘喜轲.1 000立方米LNG储罐结构及工艺设计研究[D].哈尔滨:哈尔滨商业大学,2019.
LIU X K. Structural and technological design of 1 000 cubic meter LNG tank [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2019.
- [3] 朱祖超,崔宝玲,张光,等.LNG储运安全保障技术发展及展望[J].流体机械,2024,52(9):84-97.
ZHU Z C, CUI B L, ZHANG G, et al. Current development and prospect of LNG storage and transportation and safety protection technology [J]. Fluid Machinery, 2024, 52(9): 84-97.
- [4] 宋怀德,郭宝骏,李玉华,等.低比转速LNG潜液泵的设计与工作特性研究[J].流体机械,2023,51(6):60-65.
SONG H D, GUO B J, LI Y H, et al. Research on

- design and working characteristics of low specific speed LNG submersible pump [J]. *Fluid Machinery*, 2023, 51(6):60-65.
- [5] 刘清龙.大型LNG储罐优化设计与研究[D].青岛:青岛科技大学,2014.
- LIU Q L. Optimum design and study of large-scale LNG tank [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2014.
- [6] 张继军,韩磊.16万m³LNG储罐拱顶模块化施工工艺[J].石油化工建设,2016,38(2):43-47.
- ZHANG J J, HAN L. Modular construction technology for the dome of a 160 000 m³ LNG storage tank [J]. *Petrochemical and Chemical Construction*, 2016, 38(2):43-47.
- [7] 严春妍,李午申,薛振奎,等.LNG储罐用9%Ni钢及其焊接性[J].焊接学报,2008,29(3):49-52.
- YAN C Y, LI W S, XUE Z K, et al. Review of 9%Ni steel and its weldability [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(3):49-52.
- [8] 卜华全,赵伟,臧晓飞,等.9%Ni钢用国产镍基焊丝的焊接试验研究[J].压力容器,2022,39(1):19-26.
- BO H Q, ZHAO W, ZANG X F, et al. Study on welding test of domestic nickel base welding wire for 9%Ni steel [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2022, 39(1):19-26.
- [9] 李雪梅.9%Ni钢制LNG储罐纵缝自动热丝TIG与SMAW对比研究[J].压力容器,2024,41(12):67-74.
- LI X M. Comparative study on automatic hot wire TIG and SMAW for longitudinal seam of 9%Ni steel LNG storage tank [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2024, 41(12):67-74.
- [10] 韦宝成,杨尚玉,叶忠志.LNG储罐9%Ni钢立缝全自动焊工艺研究[J].焊接技术,2020,49(7):33-36.
- WEI B C, YANG S Y, YE Z Z. Research on automatic welding technology of 9%Ni steel vertical weld of LNG storage tank [J]. *Welding Technology*, 2020, 49(7):33-36.
- [11] 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(6):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(6):113-116.
- [12] 王浩.9%Ni钢激光焊接工艺试验及焊接接头性能研究[D].衡阳:南华大学,2022.
- WANG H. Experiment and performance research of laser welding process for 9%Ni steel [D]. Hengyang: Nanhua University, 2022.
- [13] 闫强强.基于窄间隙TIG旋转电弧的9%Ni钢自动立焊技术研究[D].济南:山东大学,2018.
- YAN Q Q. Research on automatic vertical welding technology of rotating-arc narrow-gap GTAW for 9%Ni steel [D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [14] 肖操,韩小康,李顺兴,等.LNG内罐9Ni埋弧焊技术创新应用[J].焊接技术,2024,53(9):57-60.
- XIAO C, HAN X K, LI S X, et al. Innovative application of submerged arc welding technology for LNG 9Ni inner tank [J]. *Welding Technology*, 2024, 53(9):57-60.
- [15] GOOK S, EL-BATAHGY A M, GUMENYUK A. Application of hybrid laser arc welding for construction of LNG tanks made of thick cryogenic 9%Ni steel plates [J]. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2023, 10(4):659-680.
- [16] 郭鹰,杨尚玉,周聪,等.LNG储罐用9Ni钢-196℃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 °C for LNG storage tank [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2022, 39(11):9-15.
- [17] WELLS A A. Application of fracture mechanics at and beyond general yield [J]. *British Welding Research Association Report*, 1963, 10:563-570.
- [18] 李道钢.液化天然气低温储罐用9Ni钢焊接工艺研究[D].合肥:合肥工业大学,2009.
- LI D G. A study on welding process of 9Ni steel for LNG cryogenic tanks [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- [19] PARK J Y, LEE J M, KIM M H. An investigation of the mechanical properties of a weldment of 7% nickel alloy steels [J]. *Metals*, 2016, 6(11):285.

作者简介:周聪(1994),男,中级工程师,主要从事油气储运与LNG接收站建设行业材料和焊接工艺研发工作,通信地址:300450天津市滨海新区第二大街62号泰达MSD-B1-18层, E-mail:zhouc@pipechina.com.cn。

本文引用格式:

周聪,路兴才,赵龙一,等.TT自动焊在X7Ni9钢制LNG储罐内罐环焊缝焊接上的应用研究[J].压力容器,2025,42(1):1-9.
ZHOU Cong, LU Xingcai, ZHAO Longyi, et al. Application of TT automatic welding in circumferential seam welding of X7Ni9 steel LNG storage tank inner vessels [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2025, 42(1):1-9.