

X80M管线钢双连管预制环焊接头 焊接工艺与性能研究

牛先伟¹, 赵浩鸿², 靳红星³, 杨 叠¹, 杜增智³, 谢 辛³, 姚学全¹, 闫 臣¹

¹中国石油天然气管道科学研究院有限公司, 河北 廊坊

²国家石油天然气管网集团有限公司建设项目管理分公司, 河北 廊坊

³中国石油管道局工程有限公司, 河北 廊坊

收稿日期: 2024年7月25日; 录用日期: 2024年8月30日; 发布日期: 2024年9月11日

摘 要

采用GMAW + SAW焊接工艺和自主研发的移动式自动化预制设备完成了X80M管线钢双连管的预制焊接, 总结了焊接操作要点, 为下一步现场施工提供指导意见。焊后, 对焊接接头焊缝和热影响区组织进行了扫描电镜观察, 同时测定了接头拉伸、弯曲、冲击、硬度、CTOD等力学性能。试验结果表明: 所采用的焊接装备, 可以充分发挥埋弧焊热输入大、焊接效率高的特点, 完成双连管的预制焊接工作, 该工艺是对长输管道高效焊接的有益探索。焊接接头性能优良, 不同焊接位置处性能均匀, 满足现行标准要求, 但焊缝区粒状贝氏体组织的聚集和内、外埋弧焊道分界线的存在会导致焊缝区韧性下降。

关键词

双连管, 环焊缝, 埋弧焊, 力学性能, 焊接效率

Research on Welding Process and Performance of X80M Pipeline Steel Double-Connected Pipe Prefabricated Circumferential Welding Joint

Xianwei Niu¹, Haohong Zhao², Hongxing Jin³, Die Yang¹, Zengzhi Du³,
Xin Xie³, Xuequan Yao¹, Chen Yan¹

¹China Petroleum Pipeline Research Institute Co., Ltd., Langfang Hebei

²Construction Project Management Branch of China National Petroleum Pipeline Network Group Co., Ltd.,
Langfang Hebei

³China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang Hebei

文章引用: 牛先伟, 赵浩鸿, 靳红星, 杨叠, 杜增智, 谢辛, 姚学全, 闫臣. X80M 管线钢双连管预制环焊接头焊接工艺与性能研究[J]. 石油天然气学报, 2024, 46(3): 330-340. DOI: 10.12677/jogt.2024.463041

Abstract

The prefabrication welding of X80M pipeline steel double-connected pipes was completed using GMAW + SAW welding process and self-developed mobile automation prefabrication equipment. The main points of welding operation are summarized to provide guidance for the next field construction. After welding, the microstructure of the weld and heat-affected zone of the welded joint were observed by scanning electron microscopy, and the mechanical properties of the joint, such as tensile, bending, impact, hardness and CTOD were measured. The test results show that the welding equipment adopted can give full play to the characteristics of large heat input and high welding efficiency of submerged arc welding, and complete the pre-welding of double-connected pipes. This process is a beneficial exploration for efficient welding of long-distance pipeline. The welded joint has excellent performance and meets the requirements of current standards. However, the accumulation of granular bainite in the weld zone and the existence of the boundary between the inner and outer submerged arc welds will lead to a decrease in the toughness of the weld zone.

Keywords

Double-Connected Pipe, Girth Weld, Submerged Arc Welding, Mechanical Property, Welding Efficiency

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全自动焊是目前长输管道焊接最高效的焊接方式,常用的焊接方法为熔化极气体保护焊(GMAW, Gas Metal Arc Welding),焊缝成形好,焊接质量稳定[1]-[3]。但随着大口径、大壁厚高钢级管线钢的应用,焊接设备及焊接工艺的创新与探索,GMAW的焊接效率已达瓶颈。而盲目地提高熔敷速度,易产生未焊透、未熔合等缺陷[4]。同时,现行的手工焊、半自动焊、全自动焊等多种管道焊接方式多为全位置焊接,平焊、立焊、仰焊等不同焊接位置常因焊枪位置调整和重力影响,导致熔池形貌变化和传热不均匀,进而引起不同位置冲击性能和CTOD性能离散,导致焊接质量不稳定[5]-[9]。探索更高效、更高质量的焊接方法迫在眉睫。

双连管(又称“二接一”)是一种预先将两根为一组的钢管组对焊接在一起,经检测合格后并入主线路,再进行组对焊接的一种管道施工工艺。双连管预制焊接焊在固定场地内,焊接环境稳定,焊机参数无需反复调整,焊机无需频繁挪动,焊缝质量更容易保证[10][11]。探索高效率、高质量的双连管预制焊接工艺对提升长输管道施工效率意义非凡。

本文采用GMAW+埋弧焊(SAW, Submerged Arc Welding)焊接工艺对双连管进行预制焊接,焊接完成后对接头进行组织观察和力学性能测试。通过微观组织和力学试验相结合的方法,探究影响焊接接头性能的因素。对下一步指导双连管现场焊接,提升环焊接头焊接质量有重要意义。

2. 焊接材料、设备及试验方法

2.1. 母材

本研究所用母材为 X80M 直缝钢管，直径为 1219 mm，壁厚为 18.4 mm。母材化学成分和机械性能如表 1 所示。

Table 1. Chemical composition (mass fraction, %) and mechanical properties of base metal

表 1. 母材的化学成分(质量分数, %)和机械性能

化学成分	C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	V	Nb	Ti	Al	N	B
	0.055	1.65	0.17	0.011	0.001	0.099	0.117	0.144	0.135	0.005	0.048	0.013	0.024	0.005	0.0002
力学性能	屈服强度 R_{eL} (MPa)					抗拉强度 R_m (MPa)					断后伸长率 A (%)				
	590					685					29				

2.2. 焊接材料

GMAW 采用 BOEHLER SG8-P 型实心焊丝，直径为 0.9 mm。SAW 采用 KGS-H80GX 型焊丝，直径为 3.2 mm，焊剂采用 KGF-H101G (使用前 350℃烘干 2 小时)。焊材的化学成分和机械性能见表 2。

Table 2. Chemical composition (mass fraction, %) and mechanical properties of welding materials

表 2. 焊材的化学成分(质量分数, %)和机械性能

	型号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	V	Ti	Mo	B	Cu	Al
化学成分	BOEHLER SG8-P	0.06	0.68	1.56	0.008	0.009	0.02	0.84	0.001	0.07	0.003	/	0.13	0.003
	KGS-H80GX	0.05	0.33	1.82	0.009	0.002	/	/	/	0.02	0.36	0.004	0.02	/
力学性能	型号	屈服强度 R_{eL} (MPa)				抗拉强度 R_m (MPa)				断后伸长率 A (%)				
	BOEHLER SG8-P	520				595				29				
	KGS-H80GX	684				587				28.5				

2.3. 焊接系统

采用 GMAW + SAW 工艺进行双连管预制焊接。根焊采用目前管道焊接常用的 GMAW 焊接设备。双面埋弧焊采用自主研发的移动式自动化预制设备。埋弧焊包括内埋弧焊和外埋弧焊。内埋弧焊是将焊接小车安装到柔性内轨道上，通过设置焊接小车沿轨道周向行走速度，当其和钢管旋转速度大小一致，方向相反来实现平焊位置焊接。外埋弧是将焊接机头固定在水平位置，通过钢管旋转来实现平焊位置焊接。内、外埋弧焊示意分别如图 1(a)和图 1(b)所示，钢管旋转见图 1(c)。

2.4. 焊接工艺

双连管焊接工艺流程如图 2 所示，分为焊前准备和焊接两部分。焊前准备包括坡口加工、设备调试、对口和预热，焊接包括根焊焊接和内、外埋弧焊接。其中，坡口形式和焊接层道数如图 3 所示。坡口为 X 形坡口，其中上坡口面角度 $\alpha = 40^\circ$ ，下坡口面角度 $\beta = 50^\circ$ ，钝边 $p = 2.5$ mm，下坡口面高度 $h = 7.5$ mm，采用无间隙组对。如图 3(b)所示，焊接一共分为 3 道次。首先，利用 GMAW 进行第 1 道次根焊焊接。其次，在钢管内部进行第 2 道次的内埋弧焊接。最后，在钢管外部进行第 3 道次的外埋弧焊接。经实际测

量，根焊焊接所需时间为 180 s~210 s，内埋弧焊接所需时间为 360 s~380 s，外埋弧焊接所需时间为 370 s~390 s。而传统 GMAW 方法焊接 X80M D1219 × 18.4 钢管，至少需要经过 4 层 6 道的焊接，每一焊接道次所需焊接时间至少为 180 s，并且每个焊道之间均需要进行打磨处理。与传统 GMAW 工艺相比，本研究用 GMAW + SAW 工艺焊接效率得到显著提升。具体焊接工艺参数如表 3 所示。

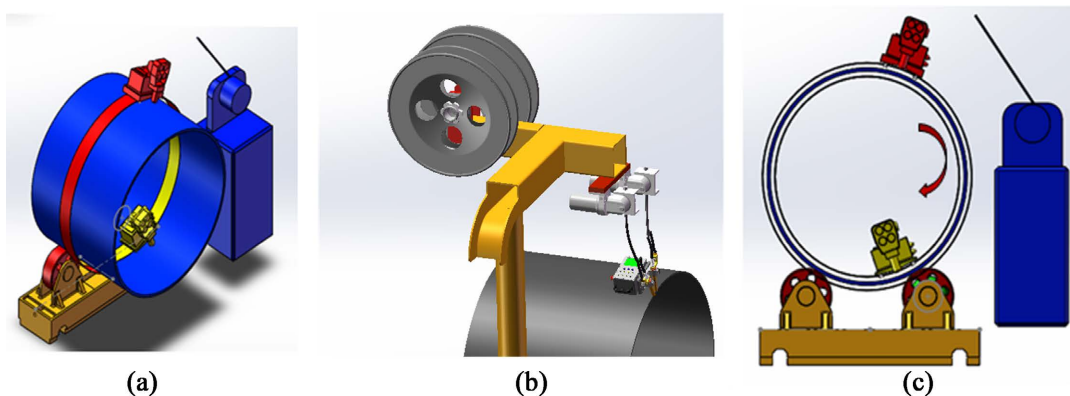


Figure 1. Schematic diagram of SAW welding process. (a) Internal SAW; (b) External SAW; (c) Rotation of the steel pipe

图 1. 埋弧焊接示意图。(a) 内埋弧焊；(b) 外埋弧焊；(c) 钢管旋转

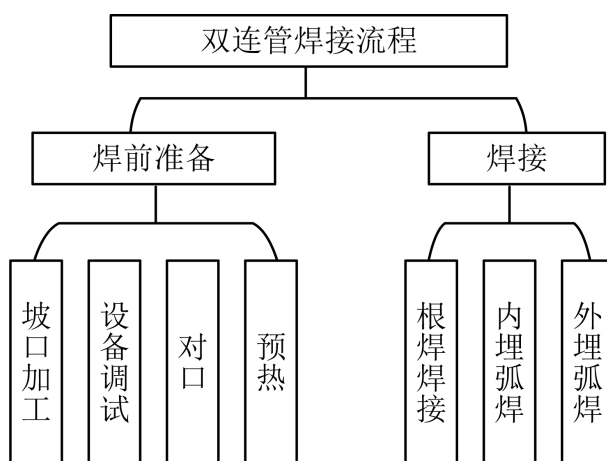


Figure 2. The welding process. (a) Groove form; (b) Number of passes of the welding layer

图 2. 双连管焊接流程。(a) 坡口形式；(b) 焊接层道数

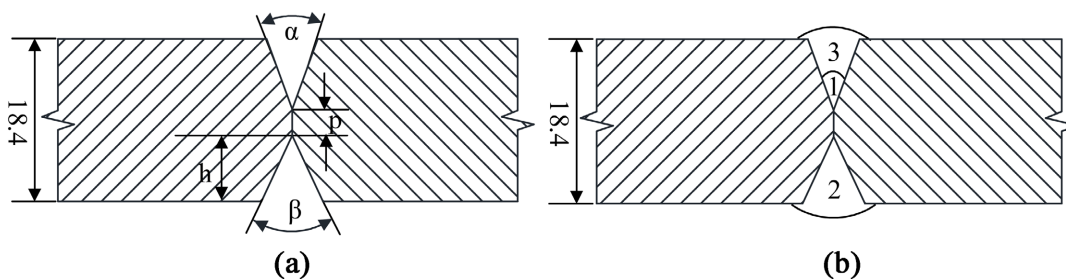


Figure 3. Groove form and number of passes of the welding layer

图 3. 坡口形式和焊接层道数

Table 3. Welding process parameters
表 3. 焊接工艺参数

焊道	焊接电流(A)	电弧电压(V)	焊接速度(cm/min)	焊接热输入(kJ/mm)
根焊	240~290	22~24	120~140	0.25~0.31
内埋弧焊	640~660	30~35	62~66	1.95~2.01
外埋弧焊	620~680	30~35	62~66	1.89~2.07

2.5. 焊接操作要点

(1) 焊接热输入是影响焊缝成型的主要因素。焊接参数主要包括焊接电流、焊接电压和焊接速度。在实际 SAW 焊接参数调试过程中,发现焊接电流对焊缝成型影响较大,例如当 SAW 焊接电流超过 700 A 时,熔深虽然较大,但是熔宽增加更明显,焊后不能保证焊缝余高要求。通过控制变量的方法,逐个调整焊接参数进行优化匹配。最终实现了全熔透,并且保证焊缝余高满足要求。

(2) 根焊主要是将钢管固定在一起,保证后续 SAW 焊接时钢管能在滚轮上同步旋转。根焊后可以确保焊剂的保护效果,同时减少埋弧焊烧穿的风险。

(3) 内埋弧焊引弧时,当焊枪角度为 5° 时开始焊接,焊接电流调整为 650 A,焊接电压调整为 30 V~35 V。在焊接过程中需要注意观察焊道成型质量,控制焊枪角度维持在 5° 左右,及时清理埋弧焊渣。在收弧时要使小车恰好在起弧的位置进行收弧,并且注意接头搭接质量。

(4) 外埋弧焊引弧时,当焊枪角度为 8° 时开始焊接,将焊接电流调整为 650 A,焊接电压调整为 30 V~35 V。在焊接过程中需要注意观察焊道成型质量,控制焊枪角度维持在 8° 左右,及时清理埋弧焊渣。

2.6. 性能试验方法

依照 DEC-OGP-G-WD-002-2020-1 对接头进行宏观金相、横向拉伸、全焊缝拉伸、弯曲(包括背弯和侧弯)、刻槽、冲击、硬度和 CTOD 试验,取样位置如图 4 所示。

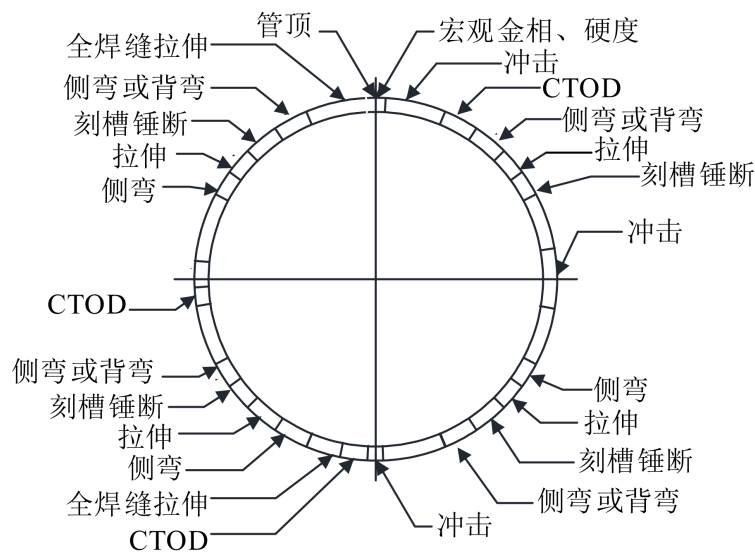


Figure 4. Schematic diagram of sampling position
图 4. 取样位置示意图

其中,宏观金相试样经打磨抛光后,用4%硝酸酒精腐蚀13 s~18 s,采用JSM-7200F型扫描电镜(SEM)观察接头组织。横向拉伸试样尺寸为18.4 mm×19 mm,全焊缝拉伸采用圆棒试样,直径5 mm,测量内埋弧焊缝和外埋弧焊缝两处焊缝性能,全焊缝拉伸试验取样示意图见图5,按照GB/T 228.1-2021进行拉伸试验。侧弯试样尺寸为25 mm×12.7 mm×230 mm,背弯试样尺寸为18.4 mm×13 mm×230 mm,弯曲试验标准为GB/T 2653-2008。刻槽锤断试样尺寸为25 mm×18.4 mm×250 mm,试验过程符合GB/T 31032-2014。冲击试样尺寸为10 mm×10 mm×55 mm,试验温度为-10℃,试验过程符合GB/T 229-2020,测量焊缝中心(WM)和热影响区(HAZ)两个位置的冲击性能,图6为冲击开缺口位置示意图。硬度试验在宏观金相试样上进行,打点位置示意图见图7。CTOD试样尺寸为14 mm×28 mm×140 mm,试验温度为-5℃,试验过程符合GB/T 21143-2014,数据处理符合ISO 15653-2018,测量WM和HAZ两个位置的CTOD值,开缺口位置见图8。

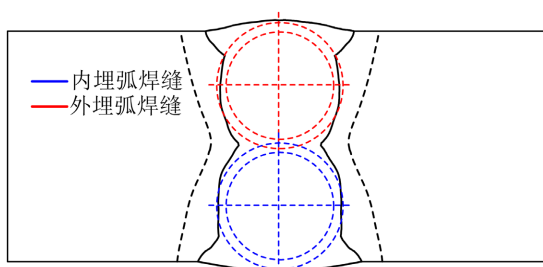


Figure 5. Full-weld tensile sampling location
图5. 全焊缝拉伸取样位置

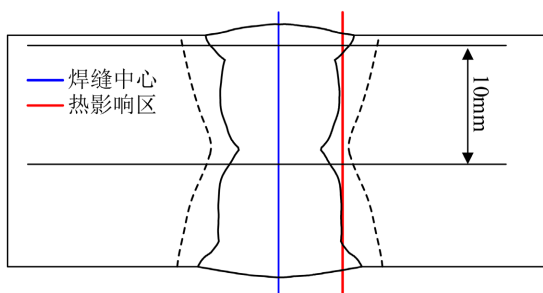


Figure 6. Notch position for impact test
图6. 冲击试验开缺口位置

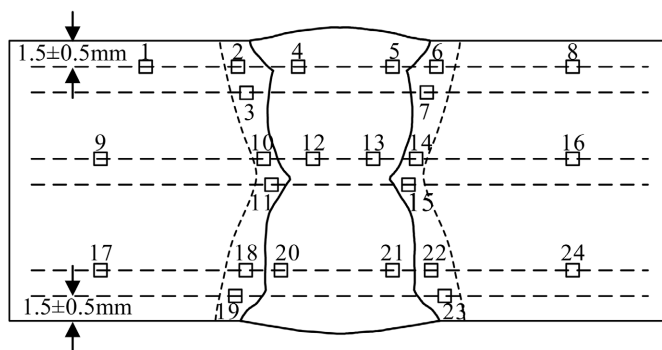


Figure 7. Dotting position for hardness test
图7. 硬度试验打点位置

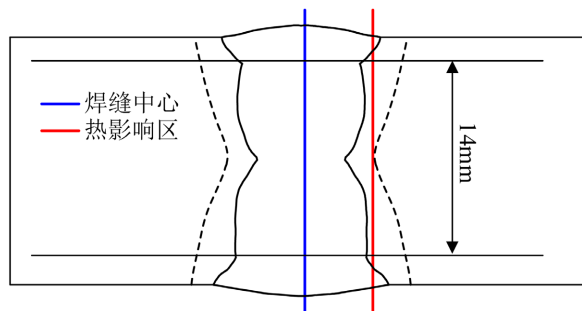


Figure 8. Notch position of CTOD test
图 8. CTOD 试验开缺口位置

3. 试验结果分析

3.1. 宏观与微观组织

图 9 为焊接完成后的宏观金相和 SEM 组织。由图 9(a)宏观金相可见, 经历过高电流、高电压及高热输入的内、外埋弧焊接后, 第 1 道次根焊焊道已经被完全熔透, 仅可观察到第 2、3 道次内、外埋弧焊接, 埋弧焊交界处可观察到明显的内、外埋弧焊道分界线。宏观金相表面无裂纹、气孔、未熔合、夹渣等缺陷, 符合宏观金相检验相关标准要求。

图 9(b)、图 9(c)分别为接头焊缝区典型组织形貌。可见焊缝区组织由不同形状的铁素体和贝氏体构成, 主要为: 针状铁素体(AF, Acicular Ferrite)、多边形铁素体(PF, Polygonal Ferrite)、板条贝氏体(BF, Bainitic Ferrite)和粒状贝氏体(GB, Granular Bainite)。这种铁素体 + 贝氏体的双相结构, 在发生变形时, 具有良好塑韧性的铁素体先应变, 可以保证焊缝金属具有较高的塑性变形能力, 高强度和高硬度的贝氏体后应变可以提供较高的强度[12]。观察不同位置焊缝组织时, 发现焊缝内部存在多处 GB 聚集区(图 9(c)), GB 晶粒尺寸本就高于其他焊缝区组织, GB 的聚集会对焊缝区韧性产生不利影响。如图 9(d)所示, 根焊焊缝区被完全熔掉, 已无法观察到根焊区组织, 仅可观察到内、外埋弧焊焊缝区的组织。两侧组织被内、外埋弧焊道分界线分隔开来, 分界线的存在使得两侧原本均匀的组织割离, 必然会对焊缝区韧性造成一定影响。

在高电流、高电压的作用下, 临近焊缝区的母材被加热到较高温度, 发生组织变化, 进而形成热影响区。图 9(e)为接头热影响区粗晶区组织形貌。可见粗晶区晶粒尺寸相对粗大, 可达 $122\ \mu\text{m}$, 属于整个接头中晶粒尺寸最大的位置。但粗晶区相邻晶粒晶界线较为平直, 并未观察到降低基体连续性, 导致韧性下降的 M-A 组元[13]。并且粗晶区组织为 AF、GB 和少量 PF, 雷玄威等人[14]和李占杰[15]等人研究表明, 当粗晶区主体组织为 AF 和 GB 时, 具有较高的韧性。综上所述, 粗晶区虽晶粒粗大, 但韧性可以得到保证。图 9(f)为热影响区细晶区组织, 晶粒细小, 尺寸在 $5\ \mu\text{m}\sim 30\ \mu\text{m}$ 之间, 主要由细小的 BF 和 PF 构成, 是接头中较为安全的区域。

3.2. 性能试验

拉伸试样断后形貌如图 10 所示。横向拉伸 4 个试样抗拉强度(R_m)分别为 679 MPa、669 MPa、673 MPa、678 MPa, 断裂位置均在母材, 断后形貌如图 10(a)。图 10(b)为全焊缝拉伸断后试样, 表 4 为全焊缝拉伸试验结果。全焊缝拉伸试样屈服强度(R_{eH})在 660 MPa 以上, 抗拉强度(R_m)在 710 MPa 以上, 与横向拉伸相比, 全焊缝拉伸抗拉强度更高, 属于高强匹配, 符合当下对高钢级管道焊缝强度匹配的要求。断后

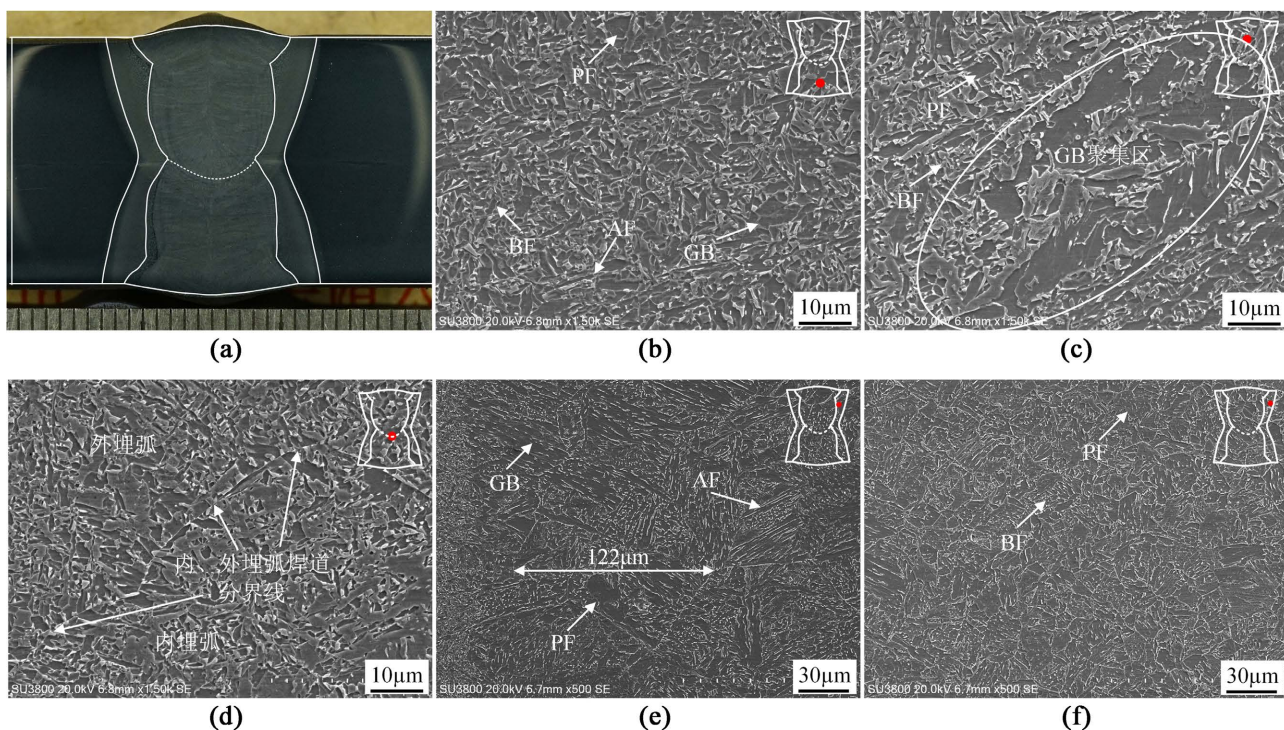


Figure 9. Macroscopic metallography and microscopic structure. (a) Macroscopic metallography; (b) Typical structure morphology of weld zone 1; (c) Typical structure morphology of weld zone 2; (d) External submerged arc welding seam structure; (e) Coarse grained zone structure; (f) Fine grained zone structure

图 9. 宏观金相与微观组织。(a) 宏观金相; (b) 焊缝区典型组织形貌 1; (c) 焊缝区典型组织形貌 2; (d) 外埋弧焊缝组织; (e) 粗晶区组织; (f) 细晶区组织

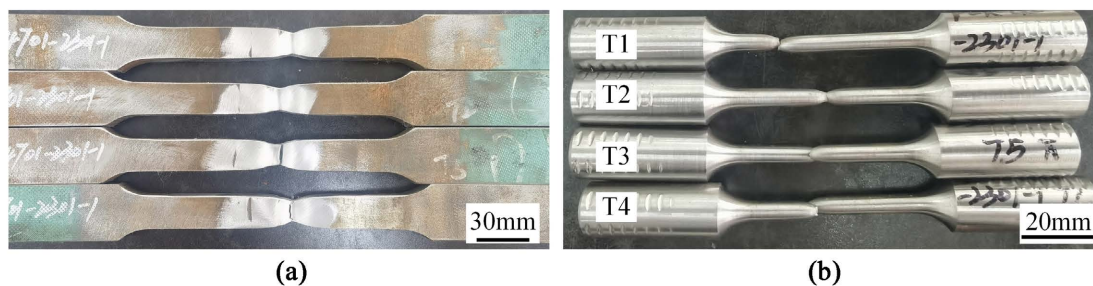


Figure 10. Tensile sample. (a) Morphology of transverse tensile sample; (b) Morphology of full-weld tensile sample

图 10. 拉伸试样。(a) 横向拉伸试样形貌; (b) 全焊缝拉伸试样形貌

Table 4. Results of full-weld tensile test

表 4. 全焊缝拉伸试验结果

编号	规格	R_{eH}/MPa	R_m/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%
T1	$\Phi 5$	669	715	25.0	69
T2	$\Phi 5$	694	736	25.5	72
T3	$\Phi 5$	671	711	27.5	71
T4	$\Phi 5$	684	730	28.0	75

伸长率在 25% 以上,断面收缩率在 65% 以上,表明试样在拉伸断裂过程中展现出了较高的塑性变形能力。焊缝金属在保证高强度的同时也体现出较高的塑性。

图 11 为刻槽锤断试样,断裂表面未见任何缺欠,刻槽锤断结果符合相关标准要求。

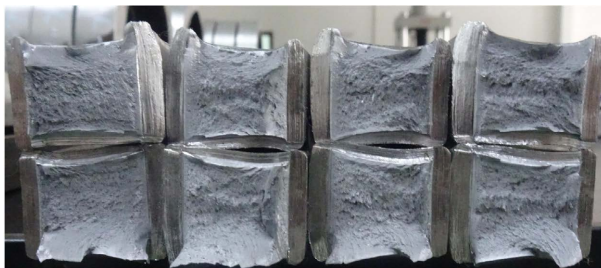


Figure 11. Notch hammer fracture sample

图 11. 刻槽锤断试样

图 12 为弯曲试样。侧弯及背弯试样表面均未产生裂纹和缺欠,接头具有良好的弯曲性能。

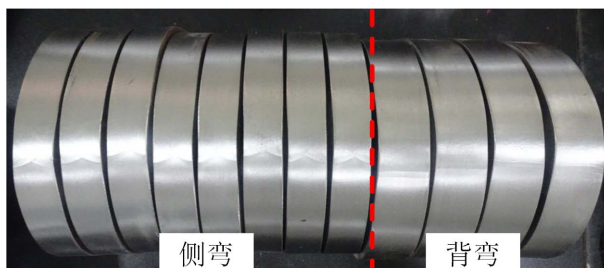


Figure 12. Bend sample

图 12. 弯曲试样

图 13 为接头不同取样位置冲击吸收功。可见,不同取样位置 WM 冲击功在 150 J~220 J 之间,HAZ 冲击功在 210 J~300 J 之间。WM 和 HAZ 冲击吸收功均呈现较高的稳定性,接头冲击性能良好。不同取样位置冲击功相似,表明研究所用的 GMAW + SAW 工艺,很好的解决了冲击性能离散的问题。原因是根焊虽为 GMAW 全位置焊接,但是后续的 SAW 焊接时,管在旋转,焊枪不动,整个 SAW 均属于平焊位置焊接,避免了进行钢管不同位置焊接时熔池形貌的变化。结合宏观金相和 SEM 观察,焊接完成后根焊焊道被完全熔透,全位置焊接的根焊已无法对接头冲击性能产生影响。综上所述,GMAW + SAW 对提高焊接接头不同位置冲击性能稳定性有显著作用。由试验结果可知,WM 处冲击功明显低于 HAZ,原因与组织中 GB 的聚集和内、外埋弧焊道分界线的存在相关。

接头硬度试验结果见图 14。接头各位置硬度值均在 180 HV₁₀~250 HV₁₀ 之间,符合现行标准对 X80 钢级焊接接头硬度的要求。不同位置处硬度变化呈现规律相似,HAZ 区域硬度值最低,母材(BM, Base Metal)与 WM 硬度值相近。

图 15 为 CTOD 试验结果,CTOD 值均高于 0.254 mm,符合现行标准要求。0 点、3 点、6 点三个位置 CTOD 值相似,并无不同位置焊接韧性离散的问题。HAZ 位置处 CTOD 值较高并且相对稳定,WM 处 CTOD 值虽合格,但是离散型较高。其离散性原因同样与焊缝组织中 GB 的聚集和内、外埋弧焊道分界线的存在相关。

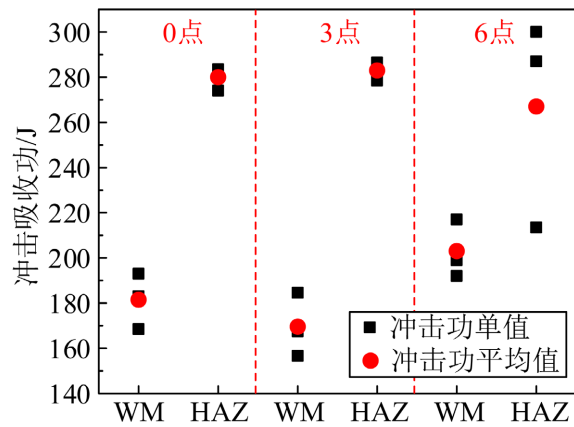


Figure 13. Impact test results

图 13. 冲击试验结果

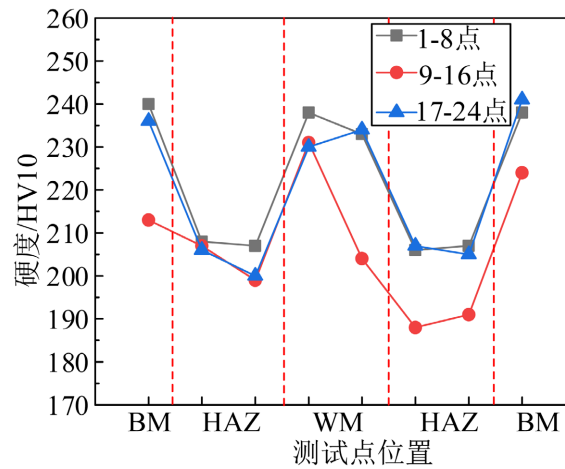


Figure 14. Hardness test results

图 14. 硬度试验结果

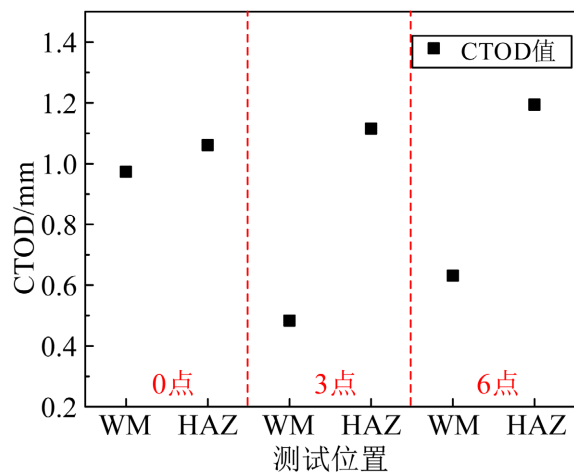


Figure 15. CTOD test results

图 15. CTOD 试验结果

4. 结论

(1) 采用 GMAW + SAW 焊接工艺和自主研制的移动式自动化预制设备完成了 X80M 管线钢双连管的预制焊接, 并对焊接操作要点进行了总结。与传统 GMAW 工艺相比, 该工艺焊接效率得到提升。

(2) 焊接接头性能优良, 解决了全位置焊接中不同位置韧性离散的问题, 可以满足现行标准要求。GMAW + SAW 焊接工艺适用于 X80M 管线钢双连管的预制焊接。

(3) 焊缝区 GB 组织的聚集和内、外埋弧焊道分界线的存在会导致焊缝区韧性下降, 致使焊缝区冲击韧性和 CTOD 值低于热影响区。建议进一步深入研究影响焊缝区韧性的因素, 并提出相应控制措施指导施工现场双连管预制焊接。

参考文献

- [1] Jia, P., Jing, H., Xu, L., Han, Y. and Zhao, L. (2019) A Modified Engineering Critical Assessment Method for Deeply-Embedded Cracks in Metallic Pipelines Subjected to Large Plastic Strain. *Engineering Fracture Mechanics*, **208**, 171-188. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.11.024>
- [2] 王鹏宇, 闫臣. 从油气管道工程建设的发展看焊接技术的进步[J]. 焊接, 2023(6): 44-51, 64.
- [3] 陆阳, 邵强, 隋永莉, 等. 大管径、高钢级天然气管道环焊缝焊接技术[J]. 天然气工业, 2020, 40(9): 114-122.
- [4] 罗志立, 隋永莉. 油气管道环焊缝自动焊未熔合影响因素[J]. 油气储运, 2023, 42(10): 1166-1174.
- [5] Yin, T., Jin, H., Zhao, H. and Zhang, Q. (2021) Effects of Ternary Shielding Gas on Weld Characteristics of All-Position Welding for Pipelines. *Science of Advanced Materials*, **13**, 2467-2474. <https://doi.org/10.1166/sam.2021.4160>
- [6] 雷正龙, 杨雨禾, 李福泉, 等. X70 钢管道全位置激光-MAG 电弧复合根焊缝成形试验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 51-57.
- [7] 付超, 刘阳, 王勇, 等. 大壁厚 X80 钢焊接 HAZ 沿壁厚方向的低温韧性[J]. 焊接, 2023(6): 9-17.
- [8] Duan, D., Lazor, R. and Taylor, D. (2010). Evaluation of Double Jointing Girth Welds of High Grade Line Pipes. 2010 8th International Pipeline Conference, 27 September-1 October 2010, Calgary, 1-8. <https://doi.org/10.1115/ipc2010-31022>
- [9] Li, L., Fu, J., Yao, Y., Wang, X., Liu, K., Han, T., et al. (2023) Generation Mechanism of Lack of Fusion in X70 Steel Welded Joint by Fully Automatic Welding under Steep Slope Conditions Based on Numerical Simulation of Flow Field. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **126**, 4055-4072. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11386-1>
- [10] 张占伟, 王浩, 肖存勇, 等. 自保护药芯焊丝焊接 X80 管线钢管环焊缝接头的显微组织与力学性能[J]. 机械工程材料, 2020, 44(5): 28-32.
- [11] North American Oil & Gas Pipelines Group (2016) RMS Welding Systems Double Jointing Services. *North American oil & Gas Pipelines*, **9**, 38.
- [12] Nie, W., Wang, X., Wu, S., Guan, H. and Shang, C. (2012) Stress-strain Behavior of Multi-Phase High Performance Structural Steel. *Science China Technological Sciences*, **55**, 1791-1796. <https://doi.org/10.1007/s11431-012-4879-5>
- [13] Omale, J.I., Ohaeri, E.G., Tiamiyu, A.A., Eskandari, M., Mostafijur, K.M. and Szpunar, J.A. (2017) Microstructure, Texture Evolution and Mechanical Properties of X70 Pipeline Steel after Different Thermomechanical Treatments. *Materials Science and Engineering: A*, **703**, 477-485. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.07.086>
- [14] 雷玄威, 吴开明, 成林, 等. 改善高强韧管线钢焊接热影响区粗晶区韧性的现状与趋势[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(5): 1-8.
- [15] 李占杰, 余圣甫, 雷毅, 等. 氧化物冶金钢 CGHAZ 中有益夹杂物的作用[J]. 焊接学报, 2007, 28(6): 57-64.