

X60 钢级 $\Phi 559$ mm \times 32 mm 直缝焊管预热 多丝埋弧焊试验研究

赵波¹, 赵与越¹, 王能干², 王强¹, 安晓军¹, 郭振其¹

(1. 中国石油集团渤海石油装备制造有限公司, 河北 青县 062658;

2. 中国石油天然气第六建设有限公司, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了提高直缝埋弧焊管多丝埋弧焊接速度, 采用预热四丝埋弧焊接工艺进行了 X60 钢级 $\Phi 559$ mm \times 32 mm 规格钢管焊接对比试验, 并与常规四丝埋弧焊工艺进行对比。对比试验发现, 与常规四丝埋弧焊工艺相比, 采用预热四丝埋弧焊工艺时, 可提高焊接速度 20%, 降低焊接线能量 10%, 整体力学性能优。证明预热多丝埋弧焊工艺在保证焊缝质量、力学性能的前提下, 可以显著提高直缝埋弧焊管的焊接速度, 是一种优质、高效、节能的埋弧焊新工艺。

关键词: 直缝焊管; 多丝埋弧焊; 预热焊丝; 高速焊

DOI:10.19938/j.steelpipe.1001-2311.2024.4.28.32

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Experimental Research on Pre-heating Multi-wire SAW Process for X60 $\Phi 559$ mm \times 32 mm LSAW Pipe

ZHAO Bo¹, ZHAO Yuyue¹, WANG Nenggan², WANG Qiang¹, AN Xiaojun¹, GUO Zhenqi¹

(1. CNPC Bohai Petroleum Equipment Manufacture Co., Ltd., Qingxian 062658,

China; 2. CNPC No.6 Construction Co., Ltd., Guilin 541004, China)

Abstract: In order to increase the multi-wire SAW welding speed for the LSAW pipe, the welding comparative experiment for the X60 $\Phi 559$ mm \times 32 mm steel pipe is conducted via the pre-heating 4-wire SAW process, and a comparison with the conventional 4-wire SAW process is made. The result shows that compared with the said conventional 4-wire SAW process, the pre-heating 4-wire SAW process brings about such advantages as the welding speed is increased by 20%, the welding wire energy consumption is reduced by 10%, and the overall mechanical performance is excellent. It is proved that under the pre-conditions that the weld quality and the mechanical properties of the pipe are guaranteed, the above mentioned pre-heating multi-wire SAW process can obviously increase the welding speed for the LSAW pipe.

Key words: LSAW pipe; multi-wire SAW process; welding wire pre-heating; hi-speed welding

油气输送用焊管多使用多丝埋弧焊^[1-6]焊接工艺生产。对于焊管制造企业而言, 首先要保证焊管的各项力学性能满足要求, 另一方面也需要考虑提高焊接生产效率、降低焊接生产成本的问题。为了提高大壁厚焊管的焊接速度, 改善焊缝及热影响区的组织性能, 本文采用焊接速度更快、焊接线能量较低的预热多丝埋弧焊接工艺进行 X60 钢级

$\Phi 559$ mm \times 32 mm 厚壁焊管试制试验研究, 现对试验情况进行介绍。

1 预热焊丝工艺基础试验

预热焊丝埋弧焊工艺是通过加大焊丝干伸长, 利用焊接电流在焊丝中产生的电阻热对焊丝进行预热, 焊丝预热温度 500~900 °C, 然后再送入电弧区域, 实现提高焊丝熔化速度和焊接速度、降低焊接线能量的焊接方法^[7-12]。为了掌握不同焊丝干伸长度对焊丝熔化速度的影响规律, 采用交流焊接电源

赵波(1975-), 男, 高级工程师, 主要从事管线钢材料、焊管管件焊接工艺及装备研发工作。

进行Φ4 mm 焊丝 30、70、90 mm 三种不同干伸长时 500~900 A 系列焊接电流下的送丝速度试验, 试验数据见表 1, 可以看出, Φ4 mm 焊丝 70、90

mm 干伸长时, 500~900 A 的平均送丝速度分别是 30 mm 干伸长的 1.25 倍、1.4 倍, 焊接电流和焊丝干伸长长度越大送丝速度提高的比例越大。

表 1 Φ4 mm 焊丝不同干伸长-送丝速度试验数据

焊接参数		送丝速度/(cm·min ⁻¹)		
电流/A	弧压/V	30 mm	70 mm	90 mm
500	30	103	119(1.16) ^①	132(1.28)
600	32	128	162(1.26)	185(1.44)
700	34	160	208(1.30)	234(1.46)
800	34	223	279(1.25)	310(1.39)
900	36	262	338(1.29)	380(1.45)

注: ①括号内数据为与 30 mm 干伸长相比时送丝速度倍数。

2 焊接对比试验

为了验证预热多丝埋弧焊工艺在直缝焊管应用的实际效果, 选取 2 根相同母材、相同坡口尺寸的、预焊好的 X60 钢级 Φ559 mm×32 mm 规格焊管进行对比试验, 两根焊管均采用 Φ4 mm 的 H08MnMoTiB 焊丝和 SJ102G 焊剂进行焊接, 所用钢板的化学成分和力学性能见表 2~3, 钢板金相组织如图 1 所示, 主要为铁素体+粒状贝氏体。

表 2 Φ559 mm×32 mm 焊管用钢板的化学成分(质量分数)

表 2 Φ559 mm×32 mm 焊管用钢板的化学成分(质量分数)													%	
C	Si	Mn	P	S	Al	N	Nb	V	Ti	Ni	Cr	Cu	Mo	
0.06	0.18	1.48	0.01	0.001	0.024	0.003	0.039	0.003	0.014	0.10	0.15	0.018	0.012	

表 3 Φ559 mm×32 mm 焊管用钢板的力学性能

屈服强度 R _{t0.5} /MPa	抗拉强度 R _m /MPa	屈强比	-30 °C夏比冲击功/J				-20 °C DWTT/%			硬度 HV10
			1	2	3	平均值	1	2	平均值	
469	572	0.82	445	441	443	443	91	90	90.5	187

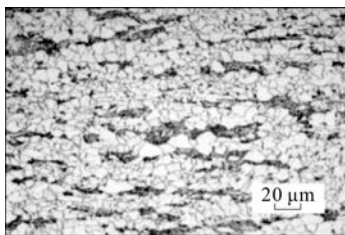


图 1 Φ559 mm×32 mm 规格焊管用钢板的金相组织

1 号和 2 号两根焊管内焊缝采用相同焊接参数的常规三丝埋弧焊工艺焊接, 仅在外焊进行了常规

四丝和预热四丝埋弧焊对比试验, 两根焊管的焊接参数见表 4。其中, 2 号焊管外焊 1 号焊丝采用直流反接极性、30 mm 正常干伸长; 2~4 号焊丝采用交流极性、70 mm 干伸长预热焊丝工艺, 预热四丝埋弧焊布置如图 2 所示。为保证熔深, 1 号焊丝的电流比常规工艺增加了 100 A; 2~4 号焊丝分别采用与 1 号焊管外焊常规工艺相同的焊接电流, 焊接电压分别增加 4 V, 预热焊丝四丝埋弧焊的焊接速度比常规四丝埋弧焊提高 20%, 焊接线能量降低约 10%。

表 4 Φ559 mm×32 mm 焊管埋弧焊接参数

焊丝 编号	内焊(常规工艺)						外焊										
	极性	干伸长/ mm	电流/ A	电压/ V	速度/ (m·min ⁻¹)	线能量/ (kJ·cm ⁻¹)	极性	干伸长/mm		电流/A		电压/V		速度/ (m·min ⁻¹)		线能量/ (kJ·cm ⁻¹)	
								常规	热丝	常规	热丝	常规	热丝	常规	热丝	常规	热丝
1	反接	30	1 140	32	0.9	66	反接	30	30	1 170	1 270	32	32	1.1	1.32	70.5	64.4
2	交流	30	890	39	0.9	66	交流	30	70	870	870	37	41	1.1	1.32	70.5	64.4
3	交流	30	700	40	0.9	66	交流	30	70	800	800	42	46	1.1	1.32	70.5	64.4
4							交流	30	70	650	650	40	44	1.1	1.32	70.5	64.4

采用预热四丝焊接工艺完成的 2 号焊管的外焊缝外观形貌如图 3 所示, 焊缝外观均匀美观, 焊趾

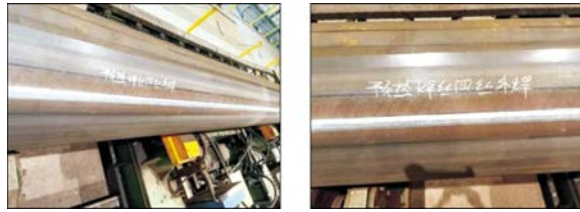
区域过渡圆滑, 焊缝熔宽 27~30 mm, 余高 1.8~2.1 mm, 两种四丝焊接工艺的焊缝宏观金相如图 4



(a) 外焊枪布置 (b) 外焊装置整体布置

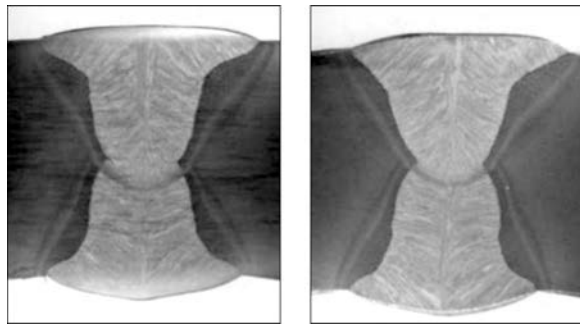
图2 预热四丝埋弧焊外焊

所示。两种焊接工艺的外焊缝及其焊趾和热影响区金相组织形貌分别如图5~7所示；外焊缝微观组织，均为 IAF+PF+B_粒+P'；外焊缝热影响区金相组织均为 B_粒+PF+MA。



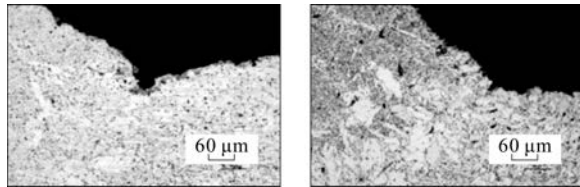
(a) 全长焊管外焊缝 (b) 局部外焊缝

图3 采用预热四丝焊接工艺的焊管的外焊缝外观形貌



(a) 常规工艺 (b) 预热焊丝工艺

图4 Φ559 mm×32 mm 规格焊管焊接接头的宏观形貌



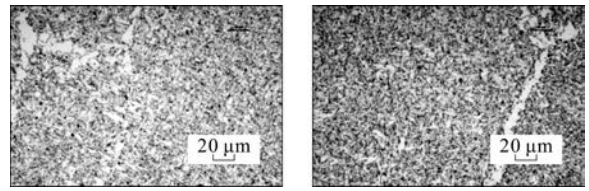
(a) 常规工艺 (b) 预热焊丝工艺

图5 Φ559 mm×32 mm 规格焊管外焊缝焊趾金相组织

3 检测数据分析

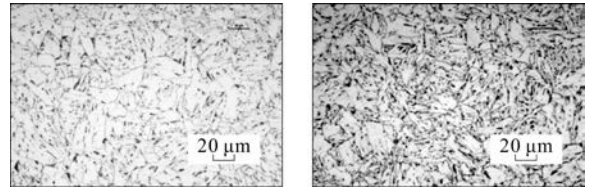
3.1 焊缝探伤数据分析

两根焊管焊接完成后，采用超声波手工探伤进行焊缝缺陷检查，探伤数据见表5。1号和2号两



(a) 常规工艺 (b) 预热焊丝工艺

图6 Φ559 mm×32 mm 焊管外焊缝微观组织



(a) 常规工艺 (b) 预热焊丝工艺

图7 Φ559 mm×32 mm 焊管外焊缝热影响区微观组织

根焊管的焊缝缺陷均为夹渣，而且夹渣深度均在18~27.3 mm，说明缺陷都在内焊缝区域，2号焊管外焊采用预热焊丝多丝埋弧焊工艺，外焊缝没有任何缺陷。因此，与常规多丝埋弧焊工艺比较，可以认为预热焊丝埋弧焊工艺不会显著增加焊缝气孔、夹渣等缺陷，不会因为采用预热焊丝埋弧焊工艺对焊缝探伤质量造成不良影响。

表5 Φ559 mm×32 mm 焊管超声波探伤数据

管号	缺陷类型	缺陷位置/mm	缺陷描述/mm		缺陷灵敏度 ^① /dB	结果
			距焊趾距离	深度		
1	夹渣	距西端 2 004	7	21	BL+3	超标
2	夹渣	距东端 290	13	21	BL-10	未超标
		距东端 5 150	17	18	BL-6	未超标
		距东端 5 270	8	27.3	BL-10	未超标
		距东端 6 370	8	26	BL-14	未超标
		距东端 6 880	9	27	BL-13	未超标

注：①“BL”是合格线。“BL+ x dB”是超出标准 x dB；“BL- x dB”是未超出标准要求，距标准 x dB。

3.2 焊缝抗拉强度分析

在1号和2号焊管上分别取焊缝横向矩形试样和焊缝纵向圆棒试样进行抗拉强度试验，结果见表6。从表6可以看出，采用预热焊丝工艺时，焊管焊缝的抗拉强度与常规工艺基本相当，可认为采用预热焊丝埋弧焊工艺不会对焊缝抗拉强度造成不利影响。

3.3 焊缝冲击韧性分析

对1号和2号焊管分别进行了0、-10、-20、-30、-40、-60℃系列试验温度下的焊缝夏比冲击

表6 Φ559 mm×32 mm 焊管焊缝的抗拉强度试验结果^①

管号	R _{0.2} /MPa	R _m /MPa		屈强比	均匀延伸率/%	断后伸长率/%
		横向	纵向			
1	600	610 ^②	635	0.94	12.25	28
2	590	625 ^②	645	0.91	10.40	30

注：①除抗拉强度外，其余数据均由焊缝纵向矩形试样测得；②断口位置均在热影响区。

试验和-20℃温度下的熔合线夏比冲击试验，试验

结果见表7，可以看出，在-60~0℃系列试验温度下，2号焊管外焊缝的冲击功分别比1号焊管提高25、31、15、57、15、59J；尤其是采用常规四丝埋弧焊工艺的外焊缝的-60℃冲击功平均值只有35J，并发生明显的韧脆转变现象，而采用预热四丝埋弧焊工艺的-60℃冲击功平均值为94J，未发生韧脆转变现象。

从表7还可以看出，1号焊管外焊缝熔合线-20

表7 Φ559 mm×32 mm 焊管外焊缝夏比冲击试验结果

管号	埋弧焊工艺	位置	试验温度/℃	冲击功/J				剪切面积百分比/%			
				1	2	3	平均值	1	2	3	平均值
1	常规四丝	焊缝	0	146	156	162	155	66	68	70	68
			-10	135	132	140	136	62	60	62	61
			-20	122	149	157	143	58	66	68	64
			-30	151	100	80	110	66	50	46	54
			-40	103	141	123	122	50	62	56	56
			-60	35	26	44	35	28	22	32	27
		熔合线	-20	387	376	388	384	100	100	100	100
2	预热四丝	焊缝	0	175	188	178	180	73	88	76	79
			-10	175	148	178	167	72	62	78	71
			-20	164	145	164	158	68	60	65	64
			-30	163	159	178	167	67	60	73	67
			-40	136	137	137	137	54	61	61	59
			-60	82	91	108	94	35	46	59	47
		熔合线	-20	374	371	367	371	100	100	100	100

℃冲击功平均值为384J；2号焊管外焊缝熔合线-20℃冲击功平均值为371J，虽然熔合线冲击功降低了13J(3.4%)，但是两种焊接工艺的外焊缝熔合线-20℃冲击功均在370J以上，热影响区冲击韧性优异。仅从本次对比试验数据来看，采用预热焊丝工艺的焊管焊缝、熔合线冲击韧性整体优于常规工艺，可以认为采用预热焊丝埋弧焊工艺不会对焊接接头冲击韧性造成不利影响。

3.4 导向弯曲试验分析

在1号和2号焊管上分别取420mm×38.1mm×32mm(长度×宽度×厚度)试样，并进行焊接接头正、反弯导向弯曲试验，弯芯直径220mm，弯曲角度180°，结果1、2号焊管的正、反弯试验均合格。结合图4可知，采用预热四丝埋弧焊工艺的外焊缝熔合线夹角大于常规四丝埋弧焊工艺的，这更有利于焊接过程中气孔和夹渣的浮出，更有利于减少弯曲试验不合格的发生。

3.5 焊缝硬度试验分析

对1号和2号焊管焊缝进行了维氏硬度检测对比试验如图8所示。可以看出，两种焊接工艺条件下，焊缝的硬度平均值几乎一样。可以认为采用预热焊丝埋弧焊工艺不会对焊缝硬度造成不利影响。

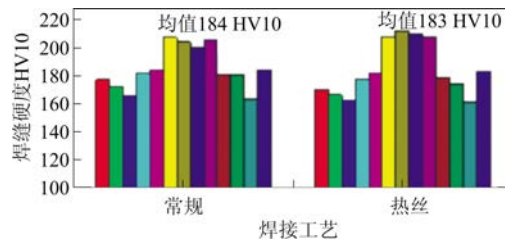


图8 Φ559 mm×32 mm 规格焊管焊缝硬度对比结果

4 结论

通过X65钢级Φ559 mm×32mm焊管外焊缝常规与预热焊丝四丝埋弧焊工艺对比试验发现，采用预热焊丝四丝埋弧焊工艺可提高焊接速度20%，

降低焊接线能量约 10%，焊缝探伤无任何缺陷，焊缝外观均匀美观，焊趾区域过渡圆滑，焊缝熔宽 27~30 mm，余高 1.8~2.1 mm。仅从两种焊接工艺下焊缝的探伤、宏观金相、抗拉试验、系列温度冲击试验、硬度试验、弯曲试验等对比试验数据，可以看出采用预热焊丝多丝埋弧焊工艺获得的焊缝的各项力学性能均等同或优于常规多丝埋弧焊工艺。

在预热焊丝四丝埋弧焊工艺外焊整个过程中，预热焊丝埋弧焊工艺启弧可靠，焊接电流、电压平稳，预热焊丝焊枪运行稳定可靠且未发生任何故障。预热焊丝焊枪设计采用了耐高温、耐磨、导电性优良的弹性导电嘴，该导电嘴的使用寿命比普通埋弧焊导电嘴提高 6~10 倍，而且在焊枪下部设计采用了耐高温、耐磨、绝缘的陶瓷管，不会出现焊丝孔偏磨的问题，杜绝了普通导电嘴长时间、大电流连续焊接工作后出现的导电嘴内孔偏磨现象。因此，可以杜绝内、外焊缝焊偏的问题。

综合以上优点，笔者认为预热焊丝埋弧焊工艺可以在直缝埋弧焊管生产线上推广应用。

参考文献

- [1] 路广平, 张志明, 吴强, 等. X65MO 钢级高性能直缝埋弧焊管的研制[J]. 钢管, 2022, 51(2): 54-58.
LU Guangping, ZHANG Zhiming, WU Qiang, et al. Research and development of X65MO high-performance SAWL pipe[J]. Steel Pipe, 2022, 51(2): 54-58.
- [2] 蔡绪明, 曾德胜, 李君佐. X70MS 抗酸直缝焊管的研制[J]. 石化技术, 2023(1): 22-25.
CAI Xuming, ZENG Desheng, LI Junzuo. Development of X70MS SAWL pipe for acid resistance [J]. Petrochemical Industry Technology, 2023(1): 22-25.
- [3] 赵世雨, 杜学铭. 直缝焊管多丝埋弧焊焊接工艺[J]. 管道技术与设备, 2009(1): 36-38.
ZHAO Shiyu, DU Xueming. Multi wire submerged arc welding process for straight seam welded pipes[J]. Pipeline Technology and Equipment, 2009(1): 36-38.
- [4] 杜健辉, 李烈军, 黄克坚, 等. 海洋隔水管用 X80 钢级高强度直缝埋弧焊管的开发[J]. 焊管, 2018, 41(11): 26-30.
DU Jianhui, LI Liejun, HUANG Kejian, et al. Development of X80 high strength straight seam submerged arc welded pipe for marine riser[J]. Welded Pipe and Tube, 2018, 41(11): 26-30.
- [5] 赵与越, 赵波, 王斌. 海底用-29℃低温抗酸直缝埋弧焊管研制[J]. 钢管, 2023, 52(2): 35-38.
ZHAO Yuyue, ZHAO Bo, WANG Bin. Development of -29℃ low temperature and acid resistant SAWL pipes for submarine service[J]. Steel Pipe, 2023, 52(2): 35-38.
- [6] 赵波, 李国鹏, 高振宇, 等. 双丝大干伸长高速焊接工艺试验研究[J]. 焊管, 2019, 42(5): 24-29.
ZHAO Bo, LI Guopeng, GAO Zhenyu, et al. Experimental research on double-wire high-speed welding process with longer wire extension[J]. Welded Pipe and Tube, 2019, 42(5): 24-29.
- [7] 赵波, 付彦宏, 王旭, 等. 焊丝大干伸长多丝埋弧焊工艺试验研究[J]. 焊管, 2018, 41(4): 7-12.
ZHAO Bo, FU Yanhong, WANG Xu, et al. Research on using of the longer wire extension SAW in multi-wire SAW [J]. Welded Pipe and Tube, 2018, 41(4): 7-12.
- [8] 赵波, 王能干, 孙奇, 等. 多丝埋弧焊低线能量化高效焊接工艺探讨[J]. 钢管, 2014, 43(4): 47-52.
ZHAO Bo, WANG Nenggan, SUN Qi, et al. Analysis on high-efficient multi-wire SAW with low heat input[J]. Steel Pipe, 2014, 43(4): 47-52.
- [9] 龙红, 李福元. 埋弧焊技术的创新——切换导电增加焊丝通电长度的热丝埋弧焊[J]. 焊接技术, 2001, 30(S1): 46-48.
LONG Hong, LI Fuyuan. Innovation of submerged arc welding technology—hot wire submerged arc welding with switching conductivity to increase the length of welding wire [J]. Welding Technology, 2001, 30(S1): 46-48.
- [10] 龙红, 王钰伟, 郭焱霞, 等. 预热焊丝埋弧焊技术在低温钢压力容器焊制的应用[J]. 中国锅炉压力容器安全, 2000, 16(6): 9-10.
LONG Hong, WANG Yuwei, GUO Yanxia, et al. Application of preheating wire submerged arc welding in welding of low temperature steel pressure vessels[J]. China Boiler and Pressure Vessel Safety, 2000, 16(6): 9-10.
- [11] 龙红, 梁树, 宫毅辉, 等. 预热焊丝埋弧焊在尿素合成塔中的应用[J]. 压力容器, 1991, 8(5): 69-72.
LONG Hong, LIANG Shu, GONG Yihui, et al. Application of preheating welding wire submerged arc welding in urea synthesis tower[J]. Pressure Vessel, 1991, 8(5): 69-72.
- [12] 赵波, 王涛, 杨玮玮, 等. 大壁厚焊管预热四丝埋弧焊工艺研究[J]. 焊管, 2021, 44(2): 1-6.
ZHAO Bo, WANG Tao, YANG Weiwei, et al. Research on preheating four-wire submerged arc welding process of large wall thickness welded pipe [J]. Welded Pipe and Tube, 2021, 44(2): 1-6.

(收稿日期: 2024-01-19; 修定日期: 2024-05-20)