

X65级双层海管外管全自动焊工艺研究

邓丽, 刘永贞, 李子轩, 孙有辉, 郭连京, 秦贞伟

海洋石油工程股份有限公司 天津 300452

摘要: 基于STT封底和全自动FCAW-G填充盖面焊接, 开发了一种适用于双层海管外管全自动焊工艺, 通过宏观形貌观察、力学性能测试等手段验证自动焊工艺下的海管焊接接头的可靠性, 满足DNV OS F101: 2017《海底管线系统》标准要求, 可应用于X65碳素钢海管外管的焊接施工。

关键词: X65; 海底管线; 双层海管外管; 全自动焊接; 焊接工艺

Research on auto welding process for X65 casing pipe of pipe-in-pipe submarine pipeline

DENG Li, LIU Yongzhen, LI Zixuan, SUN Youhui, GUO Lianjing, QIN Zhenwei

China Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300452, China

Abstract: According to the STT root and FCAW-G filling& capping welding, an automatic welding technology has been developed. The mechanical test results meet the DNV OS F101: 2017《Submarine Pipeline System》requirements. Which can be guided as the welding of X65 carbon steel of casing pipe for pipe-in-pipe pipeline laying.

Keywords: X65; pipeline; casing pipe for pipe-in-pipe; automatic welding; welding process

1 序言

近几年, 在海上油气田开发项目中, 双层海管因其良好的保温效果, 投入运营后内管受到机械损伤的概率小等特点, 在油气开发阶段仍然是采油平台间海底管道设计中的重要形式。现阶段, 国内双层海管的铺管施工仍然以半自动手工焊封底和熔化极气体保护焊接填充盖面(STT+FCAW)工艺为主要的焊接方法, 焊接施工效率仍然相对偏低。

海管全自动焊技术由于其焊接效率高、质量稳定、自动化程度高, 一直是近年来海底管道铺设焊接技术的发展趋势, 因此采用全自动焊接可显著提高外管的焊接效率和质量, 同时有效降低焊工培训的难度和施工的劳动强度^[1]。

虽然单层海管的全自动焊接技术已经在国内多个工程项目中实现了推广应用并提高了整管效率, 但是外管由于现场加工坡口耗时, 坡口组对间隙不固定, 封底焊因受内管影响而不能采用带铜衬垫对中器, 作业时受到外对口器空间限制, 以及V形坡口需要多层多道排焊的工艺因素影响, 现行的全自动焊熔化极气体保护焊(GMAW)工艺仍然无法直接复制并推广应用到外管的焊接施工中, 因此提高外管施工的全自动化程度显得十分必要和紧迫, 具有重要的工程实践意义。

双层海管外管的全自动焊接工艺, 关键在于基于V形坡口设计、排焊工艺实现双层海管外管填充、盖面焊接的全自动焊焊接技术, 解决外管施工

第一作者: 邓丽, 本科, 焊接工程师, 研究方向为海洋钢结构焊接与腐蚀防护, E-mail: dengli2@cnooc.com.cn.

无法加工坡口的工况；掌握双层海管外管全自动焊接技术，避免烧穿、未焊透、内凹及焊缝成形凸起等焊接缺陷的产生，实现外管施工的焊接技术自动焊升级，可解决现有半自动焊施工时效率低和劳动强度大的问题。

2 焊接工艺开发

2.1 焊接设备及工艺选型

封底焊接设备采用林肯公司生产的STT封底焊机，填充及盖面采用天津一新公司的YX-G168全自动设备（见图1）。STT（Surface Tension Transfer）技术能自动调节焊接电流和电弧电压达到电弧所需的瞬时热量，确保焊接电弧的稳定燃烧和有效地控制焊缝成形，电弧燃烧稳定，飞溅极小，焊缝成形好，适用于管道的封底焊接。填充、盖面的焊接可采用气体保护焊（FCAW-G）工艺，焊接生产效率更高。

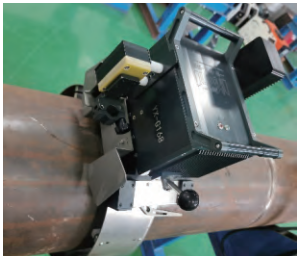


图1 YX-G168全自动焊设备

2.2 焊接母材选择

本文综合考虑海洋环境对材料的影响，试验用母材级别选用国内某钢厂生产的X65钢，满足API SPEC 5L标准要求，规格为OD355.6mm×WT14.3mm，其化学成分必须严格控制Ni、Mn、S及P等有害元素含量，为优质低碳、低合金钢管，主要化学成分见表1。试验母材的力学性能见表2。

表1 X65钢母材的化学成分 (%)

化学成分（质量分数）									P_{cm}	CE
C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Mo			
0.08	1.35	0.19	0.009	0.002	0.01	0.01	0.07	0.16		0.31

表2 X65钢母材力学性能

屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 /（%）	冲击吸收能量 /J	剪切比 /（%）	硬度 HV10	微观组织
565	616	23	331	93	242（最大值）	铁素体+珠光体+下贝氏体

2.3 焊接材料的选择

封底焊接材料的选择为AWS A5.28 ER80S-G等级，牌号为SG8-P，一是满足DNV OS F101：2017要求，适用“焊接接头比母材高强度匹配原则”；二是满足化学成分匹配，提高Si、Mn等裂纹阻止元素含量，通常要求 $w_{Ni}<1\%$ 、 $w_{Mo}<0.5\%$ ，并在焊接材料中加入适量V、Ti、Nb微量合金元素，利于细化熔敷金属晶粒，提高强度和韧性。焊接材料的化学成分见表3。

表3 焊接材料的化学成分（质量分数） (%)

焊接材料	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	N	Mo	V	Ti	Nb
SG8-P	0.07	1.52	0.68	0.008	0.010	0.16	0.85	0.03	0.003	0.001	0.01	0.05	0.01
DW-A55LSR	0.06	1.37	0.32	0.008	0.006	—	0.91	0.03	—	0.01	0.01	0.06	—

2.4 焊接参数

（1）坡口形式设计 坡口形式采用V形设计，如图2所示。为了适应STT的熔透性，钝边采用较薄厚度设计为2~4mm；坡口单边角度设计为 $30^{\circ}\pm2.5^{\circ}$ ，方便海管出厂带加工完的成品坡口且容易存储运输，单边开口宽度为 (8 ± 1) mm，可以保证有足够的熔透性，有效减小侧壁未熔合缺陷。

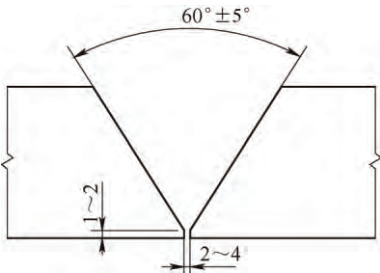


图2 坡口形式设计

（2）焊接参数 本文经过大量的试验摸索确定的焊接参数，其主要特点包括以下几个方面。

- 1) 焊前预热温度为100℃，是降低焊接接头硬度的有效措施，但层间温度应严格控制 $\leq 250^{\circ}\text{C}$ 。
- 2) 根据焊接系统、电源的特点，封底采用STT电弧模式，保护气体选用80%Ar+20%CO₂混合气体，气体流量设定为15L/min。
- 3) 热焊道、填充焊及盖面焊均采用单焊枪单丝焊接，常规FCAW-G工艺，保护气体选用80%Ar+20%CO₂混合气体，气体流量设定为20L/min，可有效提高焊接效率。
- 4) 焊接电流、电弧电压、送丝速度及焊接速度

之间相互匹配，保证根部焊道成形良好，有效避免未焊透、未熔合及气孔等焊接缺陷的产生。

5) 焊后加速冷却，水介质需要控制在200℃以下，该温度下无脆性马氏体组织转变，能有效防止

增加焊缝硬度的同时，增加AUT检测效率。

最终确定的焊接参数见表4，焊接过程平稳，效率高，可操作性强，最后得到了外形美观且无外在缺陷的焊接接头。

表4 试验用焊接参数

焊层	焊材	直径/mm	极性	保护气体		焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(cm/min)	热输入/(kJ/min)
				组分	流量/(L/min)				
封底	SG8-P	1.0	DCEP	20%CO ₂ +80%Ar	15	120~140	15~16	17~18	0.9~1.0
热焊	DW-A55LSR	1.2	DCEP	20%CO ₂ +80%Ar	20	180~200	21~22	18~20	1.2~1.3
填充	DW-A55LSR	1.2	DCEP	20%CO ₂ +80%Ar	20	220~240	22~23	15~16	1.9~2.1
盖面	DW-A55LSR	1.2	DCEP	20%CO ₂ +80%Ar	20	200~210	22~24	18~20	1.3~1.4

3 焊接接头性能测试

3.1 外观

对焊接接头进行粗磨、细磨、抛光和腐蚀，腐蚀试剂为4%硝酸酒精溶液，然后观察，焊缝的宏观形貌如图3所示。图3中未见裂纹，焊接接头无缺陷，合格。

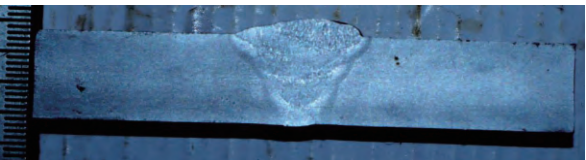


图3 焊缝宏观形貌

3.2 无损检测

焊接完成48h后，对焊件进行射线RT、手工超声波MUT、磁粉MPI以及自动超声波AUT检测，环缝焊接质量满足DNV OS F101：2017标准对于无损检验质量的要求^[2]。

3.3 力学性能

对焊缝进行了力学性能试验^[2]，包括拉伸试验、弯曲试验、冲击试验及硬度检测，所有力学试验结果（见表5~表7）满足DNV OS F101（2017、海底管线系统）的要求。

采用HVA-10A型显微硬度计检测焊接接头焊缝、熔合线、热影响区和母材4个区域的硬度，载荷为100N。其中焊缝测点间距为1mm，热影响区测点间距为0.5mm，母材区的测点间距为1mm。硬度值在150~205HV10（见图4），低于NACE MR0175：2015《含硫化氢油气田上游设备和管道的主要选材标准》对材料的硬度要求（硬度<250HV10）。

根据GB/T 232—2010《金属材料 弯曲试验方

法》的要求进行侧向弯曲试验，弯曲角为180°，弯辊直径50mm。试验在2000kN万能材料试验机上进行。弯曲试验结果见表6。由表6可知，结果均合格，未发现任何区域有裂纹产生。

试验按照GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》的要求，试样缺口位置按要求分别开在焊缝中心、熔合区、距熔合区2mm处和距熔合区5mm处，试样缺口轴线垂直于焊缝表面。试样尺寸10mm×10mm×55mm，冲击试验温度为-20℃。试验结果见表7。从表7可看出，焊接接

表5 焊缝拉伸性能

PQR	试样编号	试样厚度/mm	试样宽度/mm	试样截面积/mm ²	抗拉强度R _m /MPa	断裂部位
SP-509	A17	15.19	24.38	370.33	541	母材
	A18	14.82	23.55	349.01	558	母材

表6 焊缝弯曲性能

PQR	试样编号	厚度/mm	宽度/mm	弯曲类型	结果
SP-509	A7	15.40	16.44	侧弯	合格
	A8	14.94	16.23	侧弯	合格
	A9	14.86	16.22	侧弯	合格
	A10	15.01	16.30	侧弯	合格

表7 焊缝-20℃的冲击性能

PQR	试样编号	缺口位置	冲击吸收能量/J	平均值/J	试验结果
SP-509	A1	焊缝	69、72、63	68	合格
	A2	熔合线	212、275、178	222	合格
	A3	距熔合线+2mm	276、285、284	282	合格
	A4	距熔合线+5mm	287、282、300	290	合格

（下转第66页）

一致，平均深度约为0.92mm，侧壁的平均锥度为78.56°，加工阵列与正交试验单个凹槽的加工结果一致。

4 结束语

本文采用光纤纳秒激光对316L不锈钢材料进行加工，通过正交试验分析各参数对沟槽侧壁锥度和加工深度的影响规律，以优化后的参数加工了不同宽度和阵列沟槽结构，具体结论总结如下。

1) 正交试验表明，激光加工316L不锈钢侧壁锥度的最佳工艺参数组合为激光功率16W、扫描速度500mm/s、路径间隔0.01mm、重复频率10kHz。

2) 正交试验中的4种因素对沟槽侧壁锥度与深度的影响具有很大的差异性，激光功率是影响侧壁锥度最主要的因素，扫描速度对深度影响最显著，而重复频率对二者影响皆不显著。

3) 利用最优工艺参数成功加工15mm×1mm的阵列沟槽，平均槽深为0.92mm，侧壁的平均锥度为78.56°。

参考文献：

- [1] 肖蒲庐，陈观华，陈宇，等. 飞秒激光织构钛合金表面形貌及润湿性研究[J]. 中国激光，2023，50（16）：175-185.
- [2] 杨栋，刘圣祥，王一鑫，等. 不同工艺参数对铝合金激光深熔焊质量的影响[J]. 锻造与冲压，2020（6）：30-34.

- [3] 朱春霞，邱渤杰. 选区激光熔化316L扫描特征参数对表面形貌影响[J]. 焊接学报，2023，44（3）：114-121.
- [4] 刘宇航，李岩，李林，等. 316L不锈钢表面微织构激光加工工艺参数[J]. 烟台大学学报：自然科学与工程版，2021，34（3）：266-271，288.
- [5] CHERRY J A, DAVIES H M, MEHMOOD S, et al. Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76: 869-879.
- [6] 王英，李玉华，王新林，等. 飞秒激光加工不锈钢微型悬臂梁的工艺研究[J]. 激光技术，2010，34（3）：347-350.
- [7] 高立. 不锈钢管小群孔激光加工技术[J]. 潍坊学院学报，2007，7（6）：40-42.
- [8] 傅炳炎，欧阳八生，刘卫东，等. 0.12mm不锈钢薄板光纤激光回转法打孔工艺优化分析[J]. 光学技术，2016（2）：126-129.
- [9] 黎雪琴，林卿，赵国鑫，等. 毫秒脉冲激光倒置打孔数值模拟[J]. 现代制造技术与装备，2023，59（6）：58-60.
- [10] 李元成，张晓兵，毛忠，等. 紫外纳秒激光加工316L不锈钢微槽尺寸和形貌控制研究[J]. 应用激光，2019，39（6）：994-1001.

MW 20240118

（上接第60页）

头各区域冲击吸收能量值均在最低允许值45J以上，在组织缺陷易出现的熔合区附近，并没有出现因热影响区组织粗大而造成冲击吸收能量明显下降的现象，表明该工艺合理，在-20℃低温下有较强的抵抗外力冲击的能力，该焊接工艺的焊接接头具有良好的低温韧性。

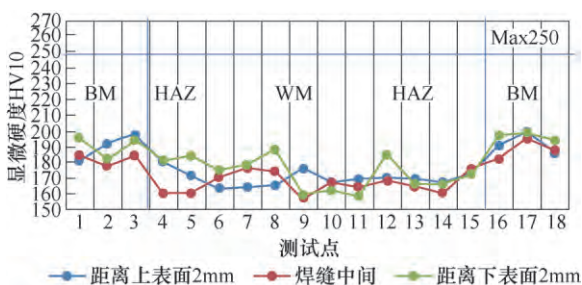


图4 焊接接头硬度分布 (SP-509)

5 结束语

1) 采用FCAW-G全自动焊设备，成功开发适用于X65钢海管焊接的全自动焊接工艺，焊接过程稳定、高效，可操作性强，获得了优良的焊接接头。

2) 力学性能试验结果均满足DNV OS F101：2017标准要求，形成了PQR文件，表明本文所开发的焊接工艺是成功的。

参考文献：

- [1] 孙有辉. 海底管道铺设全自动焊技术开发[J]. 电焊机，2014，44（3）：14-17.
- [2] DNV挪威船级社. 海底管线系统：DNV OS F101：2017[S]. 挪威：DNV挪威船级社，2017.

MW 20240209