

UNS S32750超级双相不锈钢跨接管的 GTAW焊接工艺研究

充文涛, 马铁钊, 张振东, 张龙

中海油能源发展股份有限公司清洁能源分公司 天津 300450

摘要: 某海上石油平台水下井口项目脐带缆终端与注水树连接所用的跨接管材料为 UNS S32750超级双相不锈钢。为确保跨接管现场焊接质量及性能,在产品现场施焊前,先对该材料进行焊接性分析,然后采用GTAW焊接方法进行单面焊双面成形焊接工艺试验研究。结果表明:当焊接试验选用直径2.0mm的ER2594氩弧焊丝,保护气体选用99.99%Ar,焊缝正面保护气体流量为8~12L/min,焊缝背面保护气体流量为10~15L/min,电弧电压为12~13V,焊接电流为65~80A,焊接速度为65~70mm/min,焊接热输入控制在0.67~1.08kJ/mm内,以及最大层间温度为150℃时,焊接接头的力学性能、金相组织、铁素体相比比例、点蚀性能均满足相关标准要求。研究制定的焊接工艺已成功应用于跨接管现场焊接施工中,成效显著。

关键词: 超级双相不锈钢; GTAW焊接工艺; 铁素体相比比例; 点蚀性能

Studying on the GTAW welding process of the UNS S32750 super duplex stainless steel jumper pipe

YAN Wentao, MA Tiezhao, ZHANG Zhendong, ZHANG Long

CNOOC Energy Technology & Services Limited, Clean Energy Branch, Tianjin 300450, China

Abstract: The super duplex stainless steel pipe UNS S32750 was used Jumper material from the umbilical termination head to the subsea tree for water injection in the subsea wellhead project of a offshore platform. In order to ensure product performance, the appropriate welding parameters of GTAW were used to conduct experimental research on single-sided welding and double-sided forming welding process before the production of the product by analyzing the welding characteristics of the material. The experimental results show that when the diameters of the welding material ER2594 was 2.0mm, the shielding gas was 99.99% Ar, the flow rate of protective gas on the front of the weld seam was 8~12L/min, the flow rate of protective gas on the back of the weld seam was 10~15L/min, as well as the welding current of 65~80A, the welding voltage of 12~13V, the welding speed of 65~70mm/min, the heat input of 0.67~1.08kJ/mm, and the maximum interlayer temperature of 150℃, the mechanical properties, metallographic structure, ferrite phase ratio, and pitting corrosion resistance of welded joints all meet the requirements of relevant standards. The GTAW welding process developed through research was also successfully applied in the on-site welding construction of jumper.

Keywords: super duplex stainless steel; GTAW welding process; ferrite phase ratio; pitting corrosion

1 序言

某海上石油平台新增1座水下井口用于注水，平台端注水分配管需与新增的综合生产脐带缆连接（该脐带缆集成注水管道和液压管道，并配备脐带缆终端）后将综合生产脐带缆铺设至水下采油树附近，通过跨接管将脐带缆终端连接至水下采油树。

UNS S32750超级双相不锈钢由于其独特的双相组织（奥氏体和铁素体相的体积分数各约占50%），具有稳定的双相结构，兼具铁素体优越的力学性能、良好的抗氯离子点蚀、应力腐蚀能力和奥氏体较高的塑韧性及优秀的焊接性^[1-3]，可应用于各种恶劣（海水、氯离子含量较高）的环境中。在海洋工程领域，UNS S32750超级双相不锈钢主要用于环境复杂严苛的海底运输管道、海上钻井平台、海上采油装置及海洋气田开采等领域，被认为是目前海洋工程结构用重要材料之一^[4, 5]。

焊接是海洋工程领域施工中不可或缺的关键工序环节，本文针对UNS S32750超级双相不锈钢管，结合项目施工的应用特点，开展GTAW焊接工艺试验探索，并对焊接接头的组织及力学性能、铁素体相比例和点蚀性能试验研究，为跨接管产品的焊接生产制造提供技术支持。

2 焊接性分析

为正确拟定焊接工艺，提高焊接工程质量，首先需要分析材料的焊接性。UNS S32750超级双相不锈钢焊接接头铁素体和奥氏体两相比比例的控制和耐蚀性的保证是焊接的最大难点。焊接接头的力学性能和耐蚀性对焊接热输入非常敏感，若焊接热输入高，则焊后冷却时间过长，会析出过多的奥氏体相，导致铁素体含量相对较低，最终降低了焊接接头的耐蚀性；反之，若焊接热输入低，则最终焊缝组织内铁素体相过量，最终降低焊接接头韧性^[6]。因此有效控制合理的焊接热输入和层道间温度成为影响焊接接头性能及质量的关键因素。

3 试验材料与焊接方法

3.1 焊接材料

该项目脐带缆终端与注水树连接所用的跨接管材料选用UNS S32750超级双相不锈钢管。跨接管直径为88.9mm、壁厚为5.49mm。本次试验采用与产品相同规格型号的超级双相不锈钢管进行。

焊接填充材料应选用与母材相对应的Ni含量，且Ni含量要高于母材金属^[7, 8]。本次试验焊接材料选用Exatone 25.10.4.L ER2594钨弧焊丝，规格为 ϕ 2.0mm。焊丝的化学成分见表1。钨极选用

表1 钨弧焊丝化学成分（质量分数）（%）

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu	Ti	V	N	Co	W	其他
0.011	0.38	0.019	0.0002	0.38	25.09	9.46	3.88	<0.01	0.11	0.001	0.050	0.240	0.090	0.03	42

ϕ 2.0mm的铈钨极；氩气纯度 $\geq 99.99\%$ ，瓶装氩气压力 $\geq 0.5\text{MPa}$ 。

3.2 焊接工艺试验

采用手工钨极钨弧焊（GTAW）单面焊双面成形的焊接工艺；焊接设备选用与施工现场相同的凯尔达WS-315N型钨弧焊机。焊接坡口采用机械方法加工，坡口表面应光滑平整，无毛刺及氧化色，坡口形式及尺寸如图1所示。

焊前应使用不锈钢丝刷清理试件坡口及母材两侧至少25mm范围内的区域，确保表面呈现金属光

泽，且不得有氧化物、锈迹、油污、水分及其他有害杂质。为确保待焊区域及焊丝表面干净无污染，焊前使用丙酮或工业酒精进行擦拭。清理后，焊件和焊丝不得再次受到污染，否则必须重新进行清理操作。具体焊接参数见表2。

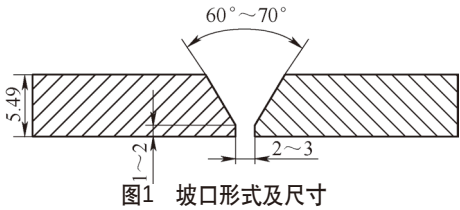


表2 手工钨极氩弧焊焊接参数

焊层	填充金属	层间温度 /℃	极性	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 / (mm/min)	热输入 / (kJ/mm)
打底	ER2594	20	DCEN	65~80	12~13	65~70	0.6~0.96
热焊	ER2594	86	DCEN	75~90	12~13	65~70	0.77~1.08
填充	ER2594	150	DCEN	75~90	12~13	65~70	0.77~1.08
盖面	ER2594	110	DCEN	75~90	12~13	65~70	0.77~1.08

4 试验结果

4.1 无损检测

试件焊接完成静置24h后，按照DNV-OS-F101—2013《海底管道系统》及相关标准要求，对焊接接头进行无损检测，包括100%外观检测、100%RT射线检测。焊件焊接接头宏观形貌如图2所示。从图2可观察到，焊缝成形良好，表面无裂纹、未熔合、未焊透及咬边等缺陷。100%RT射线检测结果无超标缺陷，满足DNV-OS-F101—2013要求。



图2 焊接接头宏观形貌

4.2 力学性能试验

根据相关标准要求，制取2个横向拉伸试样、2个背弯试样和2个面弯试样，进行力学性能试验，结果见表3。由表3可知，试验结果满足标准要求。

4.3 宏观金相试验

焊接接头的宏观金相形貌如图3所示。从图3可观察到，焊接接头完全焊透、熔合，且无裂纹、气

孔、夹渣等焊接缺陷，焊缝与母材熔合过渡良好，符合标准对焊接接头宏观金相形貌要求。

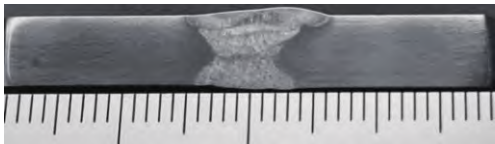


图3 焊接接头宏观金相形貌

4.4 微观组织及相比例分析

制取微观组织试样，磨抛后通过10%草酸电解腐蚀，使用型号为Imager.A 1m显微镜放大500倍进行焊接接头显微组织观察，如图4所示。由图4可知，试样焊缝、热影响区、母材组织均为奥氏体+铁素体，不含晶界碳化物、氮化物及中间金属相。

按照ASTM E562：2019《用系统人工点计数法测定体积分数的试验方法》对试件进行奥氏体与铁素体两相比例测量分析。在试件焊缝、热影响区及母材上各检测1个面，在检测面内各检测5个视场，对每个视场使用7×7网格（网格点数 $P_T=49$ ）统计落入 α 相的格点数。分析计算可得，试件焊缝区域铁素体相比例（体积分数，下同）平均值为51%，热影响区铁素体相比例平均值为59%，母材区铁素体相比例平均值为52%。均满足ASTM E562：2019对超级双相不锈钢焊缝相比例的要求：对于双

表3 力学性能试验结果

检验内容	拉伸试验	弯曲试验	硬度试验
合格标准	抗拉强度不低于母材的规定最低抗拉强度800MPa	弯曲试验后，试样在任何方向都不得有超过3mm的任何开口缺陷。少量源于试样边缘的塑性撕裂若不超过6mm，且不与明显的缺陷相连时，可忽略	热影响区和焊缝区金属的最大硬度为350HV10
检验结果	抗拉强度为830MPa、850MPa	180°弯曲，2个面弯、2个背弯试样，无缺欠	试样1：253~279HV10 试样2：249~270HV10
结果判定	合格	合格	合格

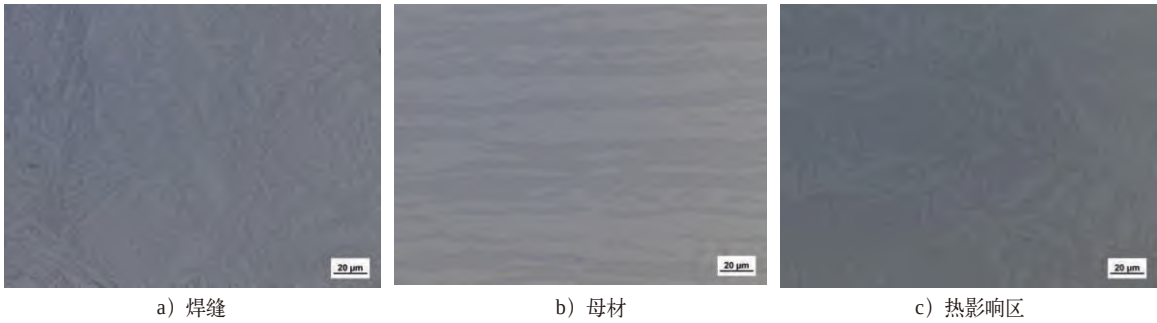


图4 焊接接头微观金相

相钢焊缝金属和热影响区的铁素体含量应为35%~65%。

4.5 点蚀试验

采用ASTM G48：2015《使用三氯化铁溶液做不锈钢及其合金的耐麻点腐蚀和抗裂口腐蚀性试验

的标准方法》方法A进行试件点蚀试验。试验温度为40℃，试验溶液为质量分数6%的Fe₂Cl₃去离子水溶液，试验持续时间为24h。腐蚀前后用天平进行称重测量，计算试验前后失重情况。试样腐蚀前后表面形貌如图5所示，点蚀试验结果见表4。由图5可

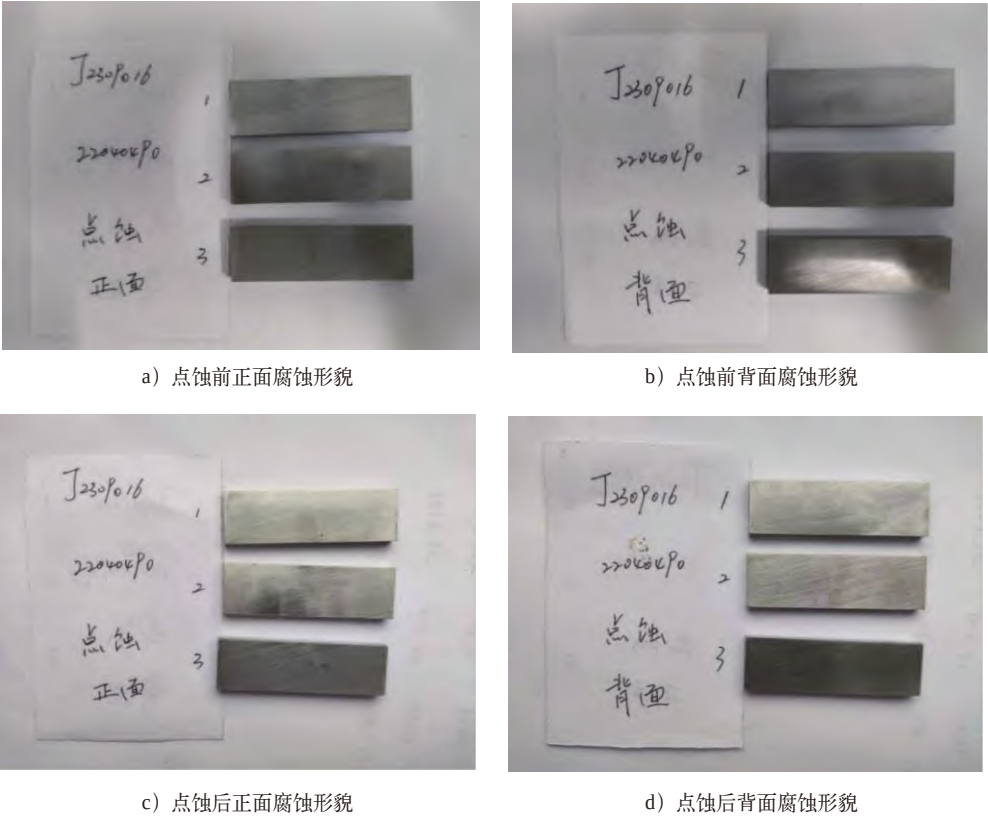


图5 试样腐蚀前后表面形貌

表4 点蚀试验结果

试样编号	1	2	3
试样尺寸/mm	50.4 × 14.96 × 4.46	49.99 × 15.01 × 4.39	49.99 × 14.93 × 4.44
表面积/cm ²	20.77	20.71	20.69
试验前质量/g	25.8657	25.4359	25.6148
试验后质量/g	25.8611	25.4354	25.6103
试验前后失重/g	0.0046	0.0005	0.0045
质量损失/ (g/m ²)	2.2	0.2	2.2

知,试样正面、背面经腐蚀后均无点蚀坑。由表4可知,点蚀试验后,试样的质量损失最大为 $2.2\text{g}/\text{m}^2$,未超过标准要求值 $4\text{g}/\text{m}^2$,试验结果符合标准要求,表明该焊接接头具有良好的耐点蚀性能。

5 结束语

通过对海洋工程项目跨接管用UNS S32750超级双相不锈钢焊接性的分析研究,制定了GTAW焊接工艺。针对试件焊接接头的无损检测、力学性能、宏观金相组织、微观金相组织、铁素体相比例及点蚀性能进行了试验分析。结果表明,针对项目中涉及的规格尺寸的跨接管,选用直径 2.0mm 的ER2594氩弧焊丝,在焊缝正面保护气体流量为 $8\sim 12\text{L}/\text{min}$,焊缝背面保护气体流量为 $10\sim 15\text{L}/\text{min}$,电弧电压为 $12\sim 13\text{V}$,焊接电流为 $65\sim 80\text{A}$,焊接速度为 $65\sim 70\text{mm}/\text{min}$,焊接热输入控制在 $0.67\sim 1.08\text{kJ}/\text{mm}$ 内,以及最大层间温度为 150°C 时,能够有效控制焊接接头铁素体相和奥氏体相两相组织的比例与焊接接头的各项性能,符合DNV-OS-F101—2013要求,可以为产品焊接提供科学依据。

该焊接工艺成功应用于海上石油平台水下井口项目脐带缆终端与注水树连接用跨接管的现场焊接施工,项目开展过程中未发现任何质量问题,各项试验指标均符合设计及标准要求。

参考文献:

- [1] 宋立新,李美艳,王永兴.一种双相不锈钢焊接接头的组织及腐蚀性能[J].焊管,2014,37(4):26-29.
- [2] 李伟,栗卓新,李国栋,等.国内外双相不锈钢焊接的研究进展[J].焊接,2007(1):11-15,61.
- [3] 陈建俊,王平,杨社教.超级双相不锈钢的焊接[J].压力容器,2003,20(11):29-32,45.
- [4] 李长春,连琰.水下生产系统在海洋石油开发中的应用[J].海洋工程,1995,13(4):25-30.
- [5] 葛华,王杰.UNS S32750超级双相不锈钢焊接工艺研究[J].金属加工(热加工),2024(6):96-100.
- [6] 杜兴吉,夏正文,王坤.深海脐带缆内套钢管全位置脉冲TIG对接焊研究[J].焊管,2014,37(11):19-22.
- [7] 张彬彬,张树才,吴敬玺,等.Ni含量对特超级双相不锈钢S32707组织与性能的影响研究[J].冶金工程,2018,5(2):39-46.
- [8] 牛虎理,刘剑,何亚章,等.脐带缆内套超级双相不锈钢S32750焊接工艺研究[J].石油工程建设,2023,49(2):49-52.
- [6] CHEN X Z, PENG H S, YAO C C, et al. Study on the effects of helium-argon gas mixture on the laser welding performance of high temperature alloys[J]. Research and Application of Materials Science, 2023, 5 (2) : 21-24.
- [7] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会.承压设备无损检测 第2部分:射线检测:NB/T 47013.2—2015[S].北京:新华出版社,2015.
- [8] JARNO K. 适合挑战性应用的创新型光纤激光技术[J].金属加工(热加工),2018(3):25-26.
- [9] 李庆,张春杰,黄展鹏,等.锂离子动力电池铝壳激光焊分析[J].焊接技术,2020,49(2):44-47.
- [10] 张明军,吴乐峰,毛聪,等.AZ31B镁合金可调环形光斑光纤激光焊接试验研究[J].中国激光,2022,49(22):53-60.
- [11] 赵海发,李小伟.环形光斑激光塑料焊接工艺研究[J].精密成形工程,2021,13(3):188-192.
- [12] 张云,吴乐峰,申晓龙,等.光束调制激光焊接技术研究现状[J].机电工程技术,2023,52(3):45-51.
- [13] 全国钢标准化技术委员会.高温合金和金属间化合物高温材料的分类和牌号:GB/T 14992—2005[S].北京:中国标准出版社,2005.
- [14] 全国钢标准化技术委员会.高温合金冷轧板:GB/T 14996—2010[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [15] 钟世杰.中厚板低碳钢激光深熔焊接工艺及气孔形成机理研究[D].广州:广东工业大学,2021.
- [16] 雷正龙,李颖,陈彦宾,等.双光束激光填丝焊接工艺对铝合金焊接气孔率的影响[J].焊接学报,2013,34(2):40-44.

MW 20240907

MW 20241107

(下转第68页)