

UNS S32750超级双相不锈钢焊接工艺研究

葛华¹, 王杰²

1. 南通振华重型装备制造有限公司 江苏南通 226000

2. 南通思英船务工程有限公司 江苏南通 226000

摘要: 为了保证UNS S32750超级双相不锈钢无缝钢管焊接质量, 充分考虑管材焊接特点, 搭配使用合理的焊接工艺, 同时开展工艺评定。试验结果显示: 通过选用合理的焊接材料、合适的焊接参数, UNS S32750超级双相不锈钢无缝钢管试样的各项力学性能、抗腐蚀性能、铁素体含量均与评估标准相匹配, 在试验焊接工艺上符合规范要求, 能满足苛刻标准、现场施工情况等多方面的需要。

关键词: S32750超级双相不锈钢; 无缝钢; 焊接工艺

Research on welding process of UNS S32750 super duplex stainless steel

GE Hua¹, WANG Jie²

1. Nantong Zhenhua Heavy Equipment Manufacturing Co., Ltd., Nantong 226000, Jiangsu, China

2. Nantong Siying Shipping Engineering Co., Ltd., Nantong 226000, Jiangsu, China

Abstract: In order to solve the welding problem of S32750 super duplex stainless steel pipe, the welding function characteristics of the pipe were fully considered, and a reasonable welding process was used in combination. At the same time, process evaluation tests were carried out. The test results showed that adopted reasonable welding materials and appropriate welding process, the mechanical properties, corrosion resistance, and ferrite content of S32750 duplex stainless steel pipeline steel pipe specimens could match the evaluation standards. The welding process met the specifications and the needs of harsh standards.

Keywords: S32750 super duplex stainless steel; seamless steel; welding technology

1 序言

液化天然气项目核心工艺模块对强度和耐蚀性要求高, 项目选材为UNS S32750超级双相不锈钢(以下简称S32750双相不锈钢)无缝钢管。S32750双相不锈钢属于含氮较多的高铬钢^[1]。此外, 材料屈服强度 $\geq 550\text{MPa}$, 抗拉强度为 $795\sim 1000\text{MPa}$, 并且在耐蚀方面较为突出。S32750双相不锈钢耐点蚀当量 $>40\%$, 抗局部腐蚀和耐应力腐蚀开裂效果好。本文客观总结材料焊接性, 合理筛选道间温度、预热温度等指标, 做好焊接材料和焊接参数的

选用, 采用焊接工艺测试的方式, 确定了合理的焊接工艺, 指导S32750双相不锈钢无缝钢管接头的焊接生产。

2 S32750双相不锈钢焊接性分析

本试验采用S32750双相不锈钢的管径为 114.3mm , 壁厚为 17.12mm 。在钢管交货时, 要求保持固溶+酸洗, 钢铁内添加Ni、Cr、Mo等不同的元素; 此外, 还需要部分微量元素的配合, 例如V, V与C、N、O有极强的亲和力, 能够在钢中形

成稳定难熔的碳化物或氮化物、氧化物，以此产生沉淀强化等效果，帮助组织功能得到提升，保持良好的强度。超级双相不锈钢管屈服强度、抗拉强度

等均符合设计标准，有着较高的低温韧性，对应的弯曲试验结果较为突出，其化学成分和力学性能见表1。

表1 S32750双相不锈钢管化学成分和力学性能

化学成分（质量分数，%）										力学性能			
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	N	R_{eH} /MPa	R_m /MPa	A（%）	（-50℃）KV/J
0.022	0.500	0.750	0.025	0.001	0.100	6.210	1.08	3.460	0.286	649	874	33	106、110、107

超级双相不锈钢焊接性能和焊接特点：①焊接性能较铁素体不锈钢更好。②工艺参数对接头性能影响较大。③焊接材料中需添加具有较高Ni含量，以便产生一个类似于母材的相。④与奥氏体不锈钢相比，双相不锈钢显微组织对于后道的热影响更加敏感。⑤后道对前道对后道影响大，双相不锈钢层间温度最大不超过100℃。

3 焊接材料的选择

根据双相不锈钢选材原则，选择GTS-2594不锈钢氩弧焊丝作为焊接S32750双相不锈钢的

填充材料，该焊接材料的名义成分（质量分数）为 $w_{Cr}=25.5\%$ 、 $w_{Ni}=9.2\%$ 、 $w_{Mo}=3.5\%$ 、 $w_N=0.25\%$ ， $P_{REN}\geq 40\%$ ，只有这样才能满足“超级双相不锈钢”的标准。上述数据均需与抗腐蚀点的半定量指示值相结合，通过含氯潮湿环境得出。

从化学成分分配原理、等强度原则^[2]，最后确定利用氩弧焊丝焊接，在焊接材料上，以P、S、H、O、N等杂质少量化为选择方向。

试验用焊接材料熔敷金属的化学成分和力学性能见表2。

表2 焊接材料熔敷金属的化学成分和力学性能

品名	型号	化学成分（质量分数，%）										力学性能				数据来源
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	N	R_{eL} /MPa	R_m /MPa	A（%）	KV /J	
氩弧焊丝GTS-2594	ASME SFA5.9 ER2594	≤ 0.03	≤ 1.0	≤ 2.5	≤ 0.025	≤ 0.02	8.0~10.5	24~27	≤ 1.5	2.5~4.5	0.2~0.3	—	≥ 800	≥ 15	≥ 27 （-46℃）	标准 复验
		0.022	0.48	0.66	0.022	0.001	8.39	24.73	0.13	3.88	0.26	683	835	31	200	

4 焊接工艺评定试验

4.1 焊接试验标准

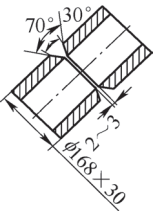
焊接工艺试验要求以美国ABS《不锈钢材料与焊接指南》、ASME BPVC Section IX—2021《焊接和钎接工艺评定》等作为参考，结合复合位置6G（6G位置指管倾斜固定45°）进行分析。

4.2 焊接参数和热输入

焊前不需要预热，只需使用氧乙炔烘枪除湿，

以确保焊接道间温度 $\leq 100^\circ\text{C}$ 。双相不锈钢焊接接头铁素体含量、热影响区晶粒度等指标在焊接热输入过程中都会产生直接的变化。在焊接热输入持续提升的同时，铁素体将同步降低，同时HAZ晶粒度会变得粗大。此外，HAZ氮化物析出增加，甚至会对接头质量有所影响^[2]。热输入通常控制在1.5kJ/mm以下。S32750双相不锈钢焊接工艺评定试验焊接参数见表3。

表3 S32750双相不锈钢焊接工艺评定试验焊接参数

序号	编号	壁厚/mm	坡口形式与尺寸	焊接位置	焊接方法及材料	焊道	道间温度/℃	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/（cm/min）
1	HP01	17.13+17.13		复合位置6G	GTAW（ $\phi 2.4\text{mm}$ ） GTS-2594	打底	26	90~100	10~12	6.5~7
						填充	50	95~110	11~13	7~9
						盖面	60	90~100	10~12	6.5~8

4.3 焊接保护气体

保护气体对不锈钢氩弧焊焊接产生重要影响，在保护气体^[3]中选择98%Ar+2%N₂，加入N₂能产生正向影响，使焊缝N含量有所增加，对抗拉强度产生正向影响的同时，持续降低Cr₂N析出和氢脆倾向，与此同时能在提升耐点蚀和耐缝隙腐蚀性能中产生正向影响。对其实施焊接时，保护气体N₂将直接熔入，N₂在电弧的影响下产生N原子，N原子则与熔池进行有效的结合。

4.4 焊前及焊接过程中的注意事项

焊前采用机械加工的方法，完成单面V形坡口，通过应用不锈钢砂轮片的方式，打磨处理坡口两侧50mm，去除油污、灰尘。采用多层多道焊接，道与道之间的温度控制在100℃以下；定位时

使用三角楔块，定位焊在坡口内，避免在材料表面弧击和起弧；焊接过程中，要求焊丝和焊枪直线摆动，减少焊缝过热问题的出现。在收弧时要求填满熔池，避免因收弧过快而导致弧坑裂纹。

5 试板无损检测和试验取样类型

在完成焊接2天后，需要检查焊缝外观。此外，试管焊缝要求完成全长RT检测，并符合质量等级要求。无损检测后，按照表4的要求，分别开展取样、试验及接头力学性能试验等项目，并严格执行ASME IX—2021规定要求。

结合具体的标准取样分析，试样类型如下：宏观腐蚀与硬度试样、金相试样、横向拉伸及侧面弯曲和冲击试样。

表4 试管焊接接头试验内容及试样数

编号	试件形式	试验项目		试样数量/个	试验方法
HP01	对接接头试件	接头拉伸		2	QW-150
		接头弯曲		4	QW-160
		冲击试验	焊缝金属	3	QW-170
			熔合线	3	
			熔合线 + 2mm	3	
			熔合线 + 5mm	3	
		接头硬度		1	ASTM E92
		宏观腐蚀		1	QW-194
		腐蚀试样		1	ASTM G48-11 (2020) e1
		金相及铁素体测定			ASTM A 923

6 力学性能试验结果

6.1 拉伸试验结果

S32750双相不锈钢拉伸试验结果见表5。结合表5可判断，接头拉伸试样抗拉强度>800MPa（标

表5 S32750双相不锈钢拉伸试验结果

编号	焊接热输入 / (kJ/cm)	样件编码	抗拉强度/MPa	屈服强度 /MPa	断裂部位	结果
HP01	12	01-1	897	—	母材	合格
		01-2	899	—	母材	合格

准值），同时试样断裂位置集中于母材，其焊缝强度比母材更高，与规范要求基本匹配。

6.2 冲击试验结果

32750双相不锈钢冲击试验结果见表6。由表6可知，焊接接头各区域的冲击试验结果均大于技术协议的验收值45J。焊接接头和熔合线是接头韧性较差的部位，靠近熔合线附近的冲击吸收能量起伏大。HAZ+5mm处韧性最高，侧向膨胀值最高。

表6 S32750双相不锈钢冲击试验结果

编号	焊接热输入 / (kJ/cm)	试验温度/℃	冲击吸收能量/J	侧向膨胀值/mm	冲击位置	结果
HP01	12	-55	55、83、76	1.09、1.22、1.16	焊缝中心	合格
		-55	63、71、78	1.10、1.19、1.17	熔合线	合格
		-55	99、102、109	1.27、1.25、1.23	熔合线+2mm	合格
		-55	158、162、151	1.29、1.31、1.26	熔合线+5mm	合格

6.3 硬度检测结果

S32750双相不锈钢硬度检测结果见表7。由表7可知，焊接接头各区域硬度均≤350HV10，要比项目技术协议的标准更低。特别是热影响区的硬度最

大，焊缝中心区硬度次之，母材硬度则最低。强度与硬度指标有直接关系，若接头硬度偏高，则强度同步提升，塑韧性有所下滑，在测试焊接接头硬度后，能客观分析出其强度和塑韧性。

表7 S32750双相不锈钢硬度检测结果

编号	焊接热输入 / (kJ/cm)	试验位置	硬度值HV10	结果
HP01	12	焊缝中心（上部）	303、309	合格
		焊缝中心（中部）	301	—
		焊缝中心（下部）	301、315	合格
		热影响区（上部）	309、328、315、327	合格
		热影响区（中部）	317、312	—
		热影响区（下部）	311、308、300、306	合格
		母材（上部）	278、267	合格
		母材（下部）	279、280	合格

6.4 侧弯试验结果

采用导向弯曲压模进行侧弯试验，弯头直径为4t，即40mm。经侧弯试验，试样截面焊缝、熔合线、热影响区等并未出现气孔、夹渣、裂纹及未熔合等缺陷，在根部也没有观察到角部裂纹，焊接材料对母材的适应性好。

6.5 腐蚀试验

采用ASTM G48-11（2020）e1 A 法进行腐蚀试验。按标准配制6%的FeCl3水溶液；试样尺寸为50mm×25mm×17mm。具体酸洗处理如下：试样使用硝酸（20%）-氢氟酸（5%）的60℃水溶液浸泡5min，空气钝化24h；试验温度为40℃，试验时间为24h。

腐蚀试验开展后的状态：用20倍放大镜进行观察，未发现试样表面腐蚀，其腐蚀率为0.28g/m²。

6.6 焊缝表面化学成分分析

根据ASME BPVC. II .A—2021 SA-751对焊缝表面的化学成分进行分析^[3]，具体结果见表8。

表8 焊缝表面化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	W	N
0.016	0.50	0.77	0.021	0.001	0.33	8.22	25.1	3.98	0.02	0.22

6.7 金相组织观察及铁素体含量测定

采用ASTM A 923方法A进行金相组织检测，检测面和部位均属于焊缝横截面，包括焊缝、热影响区、母材。腐蚀方法为氢氧化钠水溶液（40g NaOH+100g H₂O）电解腐蚀。试样经腐蚀后对检验部位的微观组织在500倍下进行观察，按 ASTM A

923方法A进行浸蚀组织评级。

铁素体含量测定按照ASTM E562。检验面及部位为焊缝横截面，焊缝（盖面、根部、中部）、其根焊热影响区两侧及母材中心两侧（见图1）；腐蚀方法：热蚀试样采用铁氰化钾、氯化钾水溶液。检测方法采用网格数点法，将检验部位的显微组织在500 倍或1000 倍下进行观察和连续拍摄不重叠视场30个，以网格数点法测试铁素体含量。针对铁素体含量分析时，以30个视场平均值为测试标准，具体结果见表9。金相组织如图2~图8所示。

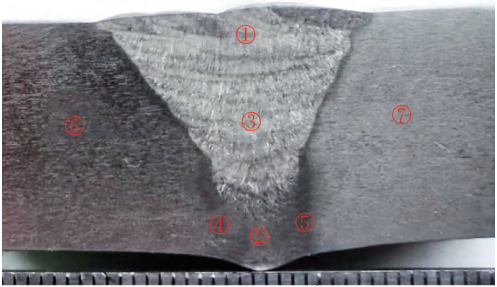


图1 铁素体检验面及部位为焊缝横截面

注：①~⑦代表不同测试位置。

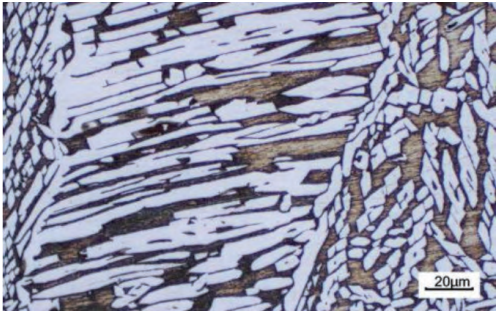


图2 焊缝盖面部位的显微组织

表9 S32750双相不锈钢金相和铁素体含量试验结果

序号	测试位置	显微组织	铁素体含量（体积分数，%）	试验结果	金相组织	试验标准
①	焊缝中心（盖面）	奥氏体+铁素体	38.13	合格	合格	ASTM E562
②	焊缝中心（根部）	奥氏体+铁素体	40.83	合格	合格	
③	焊缝中心（中）	奥氏体+铁素体	40.00	合格	合格	
④	HAZ左侧焊缝根部	奥氏体+铁素体	55.83	合格	合格	
⑤	HAZ右侧焊缝根部	奥氏体+铁素体	55.42	合格	合格	
⑥	母材中心左侧	奥氏体+铁素体	55.42	合格	合格	
⑦	母材中心右侧	奥氏体+铁素体	55.83	合格	合格	

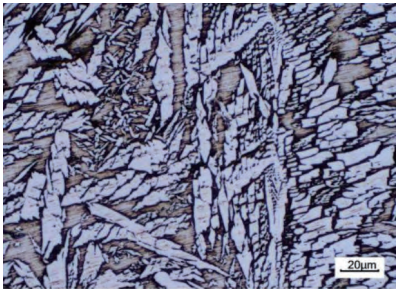


图3 焊缝根部部位的显微组织

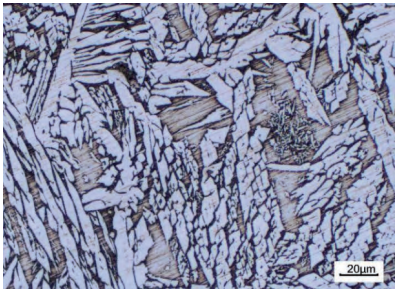


图4 焊缝中部部位的显微组织



图5 左侧热影响区（根部）区域的显微组织

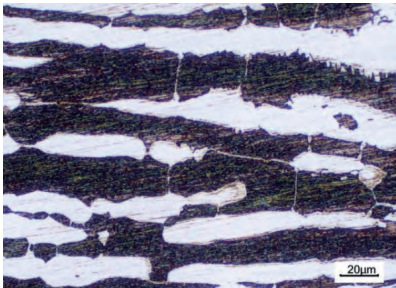


图6 右侧热影响区（根部）部位的显微组织

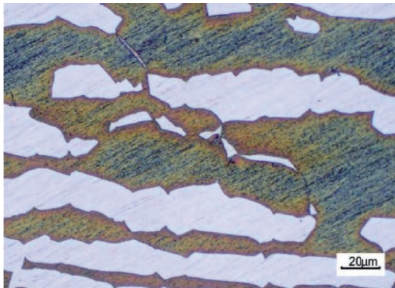


图7 母材左侧部位的显微组织

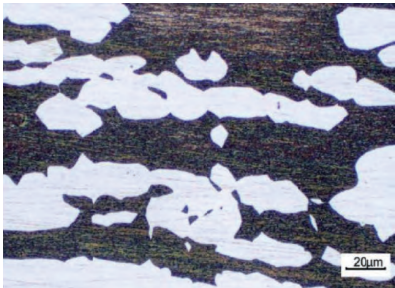


图8 母材右侧部位的显微组织

S32750双相不锈钢填充焊缝、热影响区等组织为多个分布状态下的铁素体+奥氏体，在不同区域中，并未出现碳化物、晶间相、氮化物等情况^[4]，在晶界内未呈现连续析出相，这种组织结构验证了工艺的合理性。

以上试验数据显示，各项试验结果均符合ASME IX—2021和ABS船级社的规范要求，该焊接工艺评定获得ABS船级社资质认可。

7 结束语

试验开展时，需要合理筛选焊接材料，并对预热温度和道间温度进行调整，确保焊接工艺的合理性，同时从硬度、冲击、拉伸等角度进行数据分析，使焊缝组织保持合理的形态。此外，点蚀试验要与船级社规范要求相对匹配，符合工程核心工艺

模块管道技术要求的焊缝区和热影响区铁素体含量合理，焊缝质量控制良好。

参考文献：

[1] 张秀荷. S31803 双相不锈钢焊接接头性能分析[J]. 焊接技术, 2020, 49 (5) : 29-32.

[2] 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.

[3] 颜丙锁, 仲继彬, 丁良元, 等. 超级双相不锈钢 S32750自熔焊工艺性能研究[J]. 石油和化工设备, 2021, 24 (24) : 15-18.

[4] 罗林. 超级双相不锈钢焊接工艺试验[J]. 金属加工 (热加工), 2017 (20) : 5-7.

MW 20240419