

文章编号: 1000-7466(2024)04-0065-05

# 超级双相不锈钢 S32750 深熔 TIG 焊接工艺研究

陈 晶<sup>1,2</sup>, 徐 成<sup>1,2</sup>, 金彦枫<sup>1,2</sup>, 王颖博<sup>1,2</sup>, 魏君睿<sup>1,2</sup>, 魏业奇<sup>1,2</sup>

(1.上海蓝滨石化设备有限责任公司, 上海 201518;

2.甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 为提高薄壁、大直径压力容器产品的焊接效率, 研究了 5 mm 厚超级双相不锈钢 S32750 的深熔非熔化极惰性气体保护电弧焊 (TIG) 焊接工艺。通过焊接试验和工艺评定确定了 S32750 的焊接工艺参数, 对焊接接头进行了力学性能试验和腐蚀试验。试验结果表明, 对厚度 5 mm 的 S32750 不开坡口进行焊接, 深熔 TIG 焊接可实现一次熔透, 并获得质量可靠的焊接接头, 可大幅提高薄壁、大直径超级双相不锈钢压力容器的生产效率。

**关键词:** 超级双相不锈钢; 非熔化极惰性气体保护电弧焊; 薄壁; 焊接工艺; 性能

中图分类号: TG444

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1000-7466.2024.04.012

## Study on Deep Penetration Tungsten Inert Gas Welding Procedure of Super Duplex Stainless Steel S32750

CHEN Jing<sup>1,2</sup>, XU Cheng<sup>1,2</sup>, JIN Yan-feng<sup>1,2</sup>, WANG Ying-bo<sup>1,2</sup>, WEI Jun-rui<sup>1,2</sup>, WEI Ye-qi<sup>1,2</sup>

(1.Lanpec Technologies Limited(Shanghai), Shanghai 201518, China;

2.Lanpec Technologies Limited, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to improve the welding efficiency of thin walled and large diameter pressure vessels products, the deep penetration tungsten inert gas (TIG) welding procedure of 5 mm S32750 super duplex stainless steel was studied. The welding procedure parameters were determined through welding tests and procedure qualification, and mechanical performance tests and corrosion tests were conducted on the welded joints. The results indicate that, deep penetration TIG welding can achieve one-time penetration and obtain reliable welding joints for 5 mm S32750 super duplex steel without groove. It can greatly improve the production efficiency of thin walled and large diameter super duplex stainless steel pressure vessels.

**Key words:** super duplex stainless steel; tungsten inert gas welding; thin walled; welding procedure; performance

超级双相不锈钢 SA-240 S32750 (以下简称 S32750) 的金相组织为奥氏体 + 铁素体, 两相组织各占 50% 左右。S32750 合金化程度高, 兼具奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢的双重性能<sup>[1-2]</sup>, 具有更加优异的抗点蚀、缝隙腐蚀和应力腐蚀开裂的

能力, 较高的导热性, 较低的热膨胀系数, 良好的力学性能及耐氯离子腐蚀性能<sup>[3-5]</sup>, 近年来被广泛应用于船用脱硫塔产品中。船用脱硫塔产品多为薄壁 (3~10 mm)、大直径 (2 500~6 000 mm) 压力容器, 传统的焊接工艺为手工氩弧焊开坡口焊接,

收稿日期: 2024-03-14

作者简介: 陈 晶 (1983-), 男, 甘肃兰州人, 工程师, 硕士, 从事压力容器焊接及热处理工作。

填充量大、焊接道次多、焊接效率低且变形大。

深熔非熔化极惰性气体保护电弧焊(TIG)焊机配备了2把焊枪,前焊枪为深熔TIG水冷焊枪,用于熔化母材,能够有效压缩电弧,提高电弧挺度,解决了传统TIG电弧挺度低、熔深浅及焊接效率低等缺点,借助小孔效应正面施焊反面成型,在大量重复性自动生产时可得到持续高质量的焊接接头<sup>[6-9]</sup>。后焊枪为普通TIG焊枪,用于填充坡口,具有焊接摆动功能,能实现沿焊缝方向的左右摆动,改善焊缝成型。

采用深熔TIG焊接薄壁、大直径超级双相不锈钢脱硫塔产品时无需开坡口,可提高焊接效率,减小焊接变形。文中对5 mm厚S32750的深熔TIG焊接工艺进行研究,以确定适宜的焊接工艺参数。

## 1 S32750可焊性分析

S32750焊接时冷裂纹敏感性小,易产生热裂

纹,对金属间化合物等第三相析出较为敏感<sup>[10-11]</sup>。要保证S32750的耐腐蚀性能,两相比率和金属间相是关键因素。在选择合适焊接材料的条件下,制定合理的焊接规范和层间温度,控制冷却速度以保证相比率,减少金属间相的产生,是制定焊接工艺的关键。冷却速度过慢,铁素体含量偏低,有利于有害相析出<sup>[12-13]</sup>。冷却速度过快,则奥氏体含量偏低,造成氮在铁素体相中析出。所以必须制定合理的焊接工艺参数,控制好冷却速度,获得合理的相比率。

## 2 S32750焊接试验材料及设备

### 2.1 试验材料

试验用S32750板材的化学成分见表1,主要力学性能见表2。从表1和表2可见,试板的化学成分和力学性能均满足ASME BPVC Section II, Part A—2021《Ferrous Material Specification》<sup>[14]</sup>中对SA-240材料的要求。

表1 S32750板材化学成分(质量分数)

%

项目	元素									
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	N	Cu
标准值 <sup>[14]</sup>	≤0.30	≤0.80	≤1.20	≤0.020	≤0.035	24.0~26.0	6.0~8.0	3.0~5.0	0.24~0.32	≤0.50
实测值	0.15	0.34	0.73	0.001	0.029	14.69	6.88	3.81	0.267	0.28

表2 S32750板材主要力学性能

项目	屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	伸长率/%	硬度/HV
标准值 <sup>[14]</sup>	≥550	≥795	≥15	≤310
实测值	687	897	34	278

后焊枪普通TIG的焊接材料选用与母材成分匹配的规格为 $\phi 1.2$  mm的实芯焊丝ER2594,其化学成分符合ASME BPCV Section II, Part C—2021《Specifications for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals Nonferrous Material》<sup>[15]</sup>的要求(表3)。

表3 ER2594焊丝化学成分(质量分数)

%

项目	元素										
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	N	Cu	W
标准值 <sup>[15]</sup>	≤0.03	≤1.0	≤2.5	≤0.020	≤0.030	24.0~27.0	8.0~10.5	2.5~4.5	0.24~0.32	≤1.50	≤1.0
实测值	0.02	0.4	1.0	0.001	0.018	24.7	9.6	3.8	0.24	0.2	0.4

### 2.2 焊接设备

焊接设备采用唐山开元电器集团生产的深熔TIG焊机,该设备通过气压系统将被焊工件压紧在紫铜成型槽衬板上,对壁厚10 mm以下的不锈钢材质可一次性单面焊双面成型。

## 3 S32750焊接工艺评定

### 3.1 组对与定位焊接

依照NB/T 47014—2011《承压设备焊接工艺评定》<sup>[16]</sup>对S32750进行焊接工艺评定。

焊接工艺评定试板规格(长度×宽度×厚度)为 1 000 mm×150 mm×5 mm,试板端面需机加工平整,同时去除毛刺。焊接工艺评定试板接头形式见图 1,试件组对间隙及错边量需控制在 1 mm 以内。为防止焊接时烧穿母材,组对点焊焊缝长度 30~40 mm,间隔小于等于 150 mm,点焊后打磨去除焊缝余高。

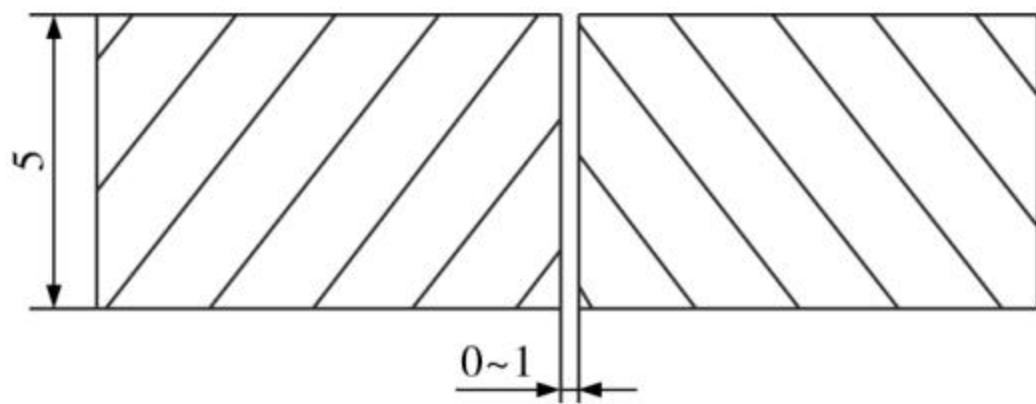


图 1 S32750 焊接工艺评定试板接头形式

### 3.2 焊前清理及预热

焊前仔细打磨待焊处及其周围 25 mm 范围母材,去除水、锈、油污、积渣和其他有害杂质。

常温下试板不需要预热,当试板温度处于 -20~0 ℃时,应将始焊处 100 mm 范围内预热到 15 ℃以上,预热过程要温和均匀。

### 3.3 焊接工艺参数

对试板采用深熔 TIG 打底、普通 TIG 盖面的顺序进行焊接,焊接工艺参数见表 4。焊接时采用纯度不小于 99.99% 的氩气进行焊枪、尾部及背面气体保护,普通 TIG 送丝速度 1 100 mm/min,两枪间距为 170~180 mm。S32750 试板焊接顺序见图 2。

表 4 S32750 试板焊接工艺参数

焊道次序	焊接方法	焊丝种类	焊丝直径/ mm	焊接电流/ A	焊接电压/ V	焊接速度/ (mm/min)	氩气体积流量/(L/min)		
							焊枪	尾部	背面
1	深熔 TIG	自熔	—	320	15.0	290	23	23	25
2	普通 TIG	ER2594	1.2	200	14.3	290	23	23	25

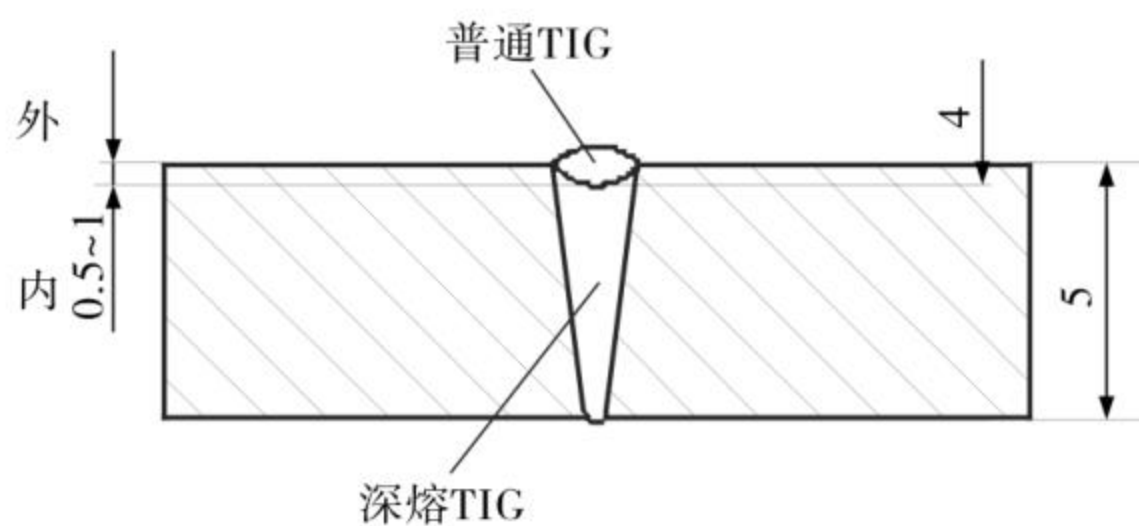


图 2 S32750 试板焊接顺序示意图

## 4 S32750 焊接工艺评定试板性能检测

焊后 S32750 试板实物见图 3,外观检测显示焊缝成型美观,未发现表面裂纹和气孔等缺陷。

依据 NB/T 47013—2015 《承压设备无损检测》<sup>[17]</sup> 对焊接工艺评定试板焊缝进行渗透检测 (PT) 和射线检测 (RT),PT 检测结果符合 I 级,RT



(a) 焊缝正面



(b) 焊缝背面

图 3 焊后 S32750 试板实物

显示焊缝质量较好,未发现裂纹和未熔合,达到 II 级合格指标。

依据 NB/T 47014—2011 对焊接工艺评定试

板焊接接头进行力学性能检测,检测结果见表 5。表 5 数据显示,焊接接头强度满足 NB/T 47014—2011 的要求。

表5 焊接工艺评定试板焊接接头力学性能试验检测结果

试样厚度 /mm	试样宽度 /mm	拉断力值 $F_m/kN$	抗拉强度 $R_m/MPa$	断裂 位置
4.98	20.10	88.735	886	焊缝
4.95	20.10	89.644	896	焊缝

依据 NB/T 47014—2011 对焊接工艺评定试板进行面弯、背弯试验。共制备了 4 件试样,试样厚度 5 mm,弯轴直径  $D=20$  mm,弯角  $180^\circ$ 。试样弯曲到规定角度后,其弯曲面上没有超标的开口缺陷,横向面弯、背弯检测结果均满足 NB/T 47014—2011 的要求。

依据 ASTM A923 B—2014 《Standard Test Methods for Detecting Detrimental Intermetallic Phase in Duplex Austenitic/Ferritic Stainless Steels》<sup>[18]</sup>,对焊接工艺评定试板焊接接头进行  $-40^\circ\text{C}$  冲击试验,冲击试样规格为  $2.5\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 55\text{ mm}$ ,检测结果见表 6。从表 6 看出,冲击功  $KV_2$  测试值均满足对  $2.5\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 55\text{ mm}$  小尺寸试样的合格判定标准 ( $KV_2\geq 13.5\text{ J}$ ),表明焊接接头中无金属间化合物产生,满足船用脱硫塔的使用要求。

表6 焊接工艺评定试板焊接接头冲击试验检测结果

检测位置	冲击功 $KV_2/J$
焊缝	36.5,33.5,34.0
热影响区	26.5,28.5,27.0

按照 GB/T 1954—2008 《铬镍奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量测量方法》<sup>[19]</sup>对焊接工艺评定试板焊接接头进行铁素体含量测量,结果见表 7。通过金相组织分析及组织测定,焊接接头的焊缝和热影响区无第三相产生,铁素体含量满足标准中 30%~60% 的要求。

表7 焊接工艺评定试板焊接接头铁素体含量检测结果

检测位置	铁素体含量平均值/%
母材	46
正面焊缝	56
正面热影响区	44
背面焊缝	59
背面热影响区	55

依据 GB/T 17897—2016《金属和合金的腐蚀 不锈钢三氯化铁点腐蚀试验方法》<sup>[20]</sup>对焊接工艺评定试板进行点腐蚀试验,试验介质按方法 A 制备,3 件试件在  $(22\pm 1)^\circ\text{C}$ 、6% (质量分数)的

$\text{FeCl}_3$  溶液中经过 24 h 之后,最大腐蚀速率为  $1.32\text{ mg}/(\text{dm}^2\cdot\text{d})$ ,平均腐蚀失重  $0.98\text{ mg}/(\text{dm}^2\cdot\text{d})$ ,小于标准要求的  $10\text{ mg}/(\text{dm}^2\cdot\text{d})$ 。在 20 倍放大镜下检查试样热影响区、焊缝区及母材区的腐蚀情况,表面未发现点腐蚀。

依据 GB/T 17898—1999《不锈钢在沸腾氯化镁溶液中应力腐蚀试验方法》<sup>[21]</sup>对焊接工艺评定试板进行应力腐蚀试验,试样按照 GB/T 15970.3—1995《金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第 3 部分:U 型弯曲试样的制备和应用》<sup>[22]</sup>进行制备,试验介质为质量分数 42% 的  $\text{CaCl}_2$  溶液,试验温度为  $(118\pm 1)^\circ\text{C}$ ,试验时间 360 h。应力腐蚀试验后在 10 倍放大镜下目视检查,试样焊缝部位无裂纹。

## 5 结束语

通过焊接试验和工艺评定,得到了 5 mm 厚超级双相不锈钢 S32750 不开坡口深熔 TIG 焊接工艺参数。焊接工艺评定试板的力学性能和腐蚀试验结果表明,深熔 TIG 焊接可实现一次熔透,获得质量可靠的焊接接头,大幅提高薄壁、大直径压力容器产品的生产效率。本研究对超级双相不锈钢压力容器的深熔 TIG 制造具有积极推广意义。

## 参考文献:

- [1] 王仓,黄龙飞,王燕秋.超级双相不锈钢 S32750 焊接工艺的探讨[J].金属加工(热加工),2011(8):54-56.  
WANG C,HUANG L F,WANG Y Q. Super duplex stainless steel S32750 welding process [J].Metal working,2011(8):54-56.
- [2] GOWTHAMAN P S,JEYAKUMAR S,SARAVANAN B A. Machinability and tool wear mechanism of duplex stainless steel—A review[J]. Materials today:Proceedings,2020,26:1423-1429.
- [3] 吴玖.双相不锈钢[M].北京:冶金出版社,1999.  
WU J. Duplex stainless steel [M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,1999.
- [4] 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.  
CHEN J J,WANG P,YANG S J. Welding of super duplex stainless steels [J]. Pressure vessel technology,2003,20(11):29-32.
- [5] 高娃,罗建民,杨建君.双相不锈钢的研究进展及其应用[J].兵器材料科学与工程,2005,28(3):61-64.  
GAO W,LUO J M,YANG J J. Research progress and application of double phase stainless steel [J].

- Ordnance material science and engineering, 2005, 28 (3): 61-64.
- [6] 刘自刚,瞿怀宇,曹瑞昌,等. DP-TIG 焊接方法工艺研究[J]. 焊接, 2017(3): 61-65.  
LIU Z G, QU H Y, CAO R C, et al. Research on DP-TIG welding method and process[J]. Welding, 2017(3): 61-65.
- [7] 刘自刚,陈飞,唐海鸿,等. DP-TIG 高速焊接工艺研究[J]. 兰州理工大学学报, 2020, 46(6): 33-37.  
LIU Z G, CHEN F, TANG H H, et al. Research on DP-TIG high-speed welding process [J]. Journal of Lanzhou university of technology, 2020, 46(6): 33-37.
- [8] 闫兴贵,赵国英. DP-TIG 与 TIG 组合焊在储罐上的应用[J]. 焊接, 2018(5): 45-47.  
YAN X G, ZHAO G Y. Application of DP-TIG and TIG combination welding on storage tanks [J]. Welding, 2018(5): 45-47.
- [9] Feng Yueqiao, Luo Zhen, Liu Zuming, et al. Keyhole gas tungsten arc welding of AISI 316L stainless steel[J]. Materials and design, 2015(85): 24-31.
- [10] 黄嘉琥. 压力容器用双相不锈钢 (一)[J]. 压力容器, 2015, 32(2): 1-20.  
HUANG J H. Duplex stainless steel for pressure vessels (1) [J]. Pressure vessel technology, 2015, 32(2): 1-20.
- [11] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册 第二卷: 材料的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.  
Chinese Society of Mechanical Engineering Welding Society. Welding manual—Volume 2: Material welding[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [12] Huang Chi Shang, Shih Chia Chang. Effects of nitrogen and high temperature aging on  $\sigma$  phase precipitation of duplex stainless steel [J]. Materials science and engineering: A, 2005(1): 66-75.
- [13] 高勤义. UNS S32750 超级双相不锈钢焊接工艺 [J]. 金属加工(热加工), 2015(20): 62-63.  
GAO Q Y. Welding process of UNS S32750 super duplex stainless steel [J]. Metal working, 2015(20): 62-63.
- [14] Ferrous material specification: ASME BPVC Section II, Part A—2021[S].
- [15] Specifications for welding rods, electrodes, and filler metals nonferrous material: ASME BPCV Section II, Part C—2021[S].
- [16] 承压设备焊接工艺评定: NB/T 47014—2011[S].  
Welding procedure qualification for pressure equipment: NB/T 47014—2011[S].
- [17] 承压设备无损检测: NB/T 47013—2015[S].  
Nondestructive testing of pressure equipments: NB/T 47013—2015[S].
- [18] Standard test methods for detecting detrimental intermetallic phase in duplex austenitic/ferritic stainless steels: ASTM A923 B—2014[S].
- [19] 铬镍奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量测量方法: GB/T 1954—2008[S].  
Methods of measurement for ferrite content in austenitic Cr-Ni stainless steel weld metals: GB/T 1954—2008[S].
- [20] 金属和合金的腐蚀 不锈钢三氯化铁点腐蚀试验方法: GB/T 17897—2016[S].  
Corrosion of metals and alloys—Corrosion test for pitting corrosion resistance of stainless steel in the ferric chloride solution: GB/T 17897—2016[S].
- [21] 不锈钢在沸腾氯化镁溶液中应力腐蚀试验方法: GB/T 17898—1999[S].  
Test method for stress corrosion-cracking resistance of stainless steels in a boiling magnesium chloride solution: GB/T 17898—1999[S].
- [22] 金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第3部分: U型弯曲试样的制备和应用: GB/T 15970.3—1995[S].  
Corrosion of metals and alloys—Stress corrosion testing—Part 3: Preparation and use of U-bend specimens: GB/T 15970.3—1995[S].

(张编)

欢 迎 赐 稿  
欢 迎 刊 登 广 告  
欢 迎 加 入 期 刊 理 事 会  
唯 一 投 稿 电 子 邮 箱 :  
syhgsb@163.com  
在 线 投 稿 :  
<http://syhgsb.paperopen.com>  
微 信 公 众 号 :  
石 油 化 工 设 备