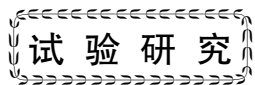


doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2021.05.004



# 热丝 TIG 堆焊 UNS S32707 特超级双相不锈钢 工艺试验研究

王 纯<sup>1</sup>, 贾小斌<sup>2,3</sup>, 冯 伟<sup>1</sup>, 杜金涛<sup>2,3</sup>, 王志刚<sup>2,3</sup>, 张建晓<sup>2,3</sup>

(1. 哈尔滨威尔焊接有限责任公司, 哈尔滨 150028; 2. 兰州兰石重型装备股份有限公司, 兰州 730314;  
3. 甘肃省压力容器特种材料焊接重点实验室, 兰州 730314)

**摘 要:**采用热丝 TIG 堆焊方法, 对 UNS S32707 特超级双相不锈钢进行堆焊试验, 并对堆焊层化学成分、力学性能、金相组织及耐腐蚀性能进行了测试。结果表明, 热丝 TIG 是堆焊该材料的有效焊接方法, 在一定的焊接及热处理规范下堆焊层各项性能均符合相关要求。

**关键词:**UNS S32707; 热丝 TIG; 堆焊; 铁素体

**中图分类号:**TH142; TG455      **文献标志码:**A

## Experimental research on hot wire TIG overlay welding process of UNS S32707 super duplex stainless steel

WANG Chun<sup>1</sup>, JIA Xiaobin<sup>2,3</sup>, FENG Wei<sup>1</sup>, DU Jintao<sup>2,3</sup>, WANG Zhigang<sup>2,3</sup>, ZHANG Jianxiao<sup>2,3</sup>

(1. Harbin Well Welding Co., Ltd., Harbin 150028, China; 2. Lanzhou Lanshi Heavy Equipment Co., Ltd., Lanzhou 730314, China;  
3. Gansu Province Pressure Vessel Special Material Welding Key Laboratory, Lanzhou 730314, China)

**Abstract:** Overlay welding test is carried out on UNS S32707 super duplex stainless steel by hot wire TIG, and the chemical composition, mechanical properties, metallographic structure and corrosion resistance of the surfacing layer are tested. The results show that hot wire TIG is an effective welding method for depositing this material, under certain welding and heat treatment specifications, all properties of the surfacing layer meet relevant requirements.

**Key words:** UNS S32707; hot wire TIG; overlay welding; ferrite

## 0 引言

随着石化行业生产规模的扩大及原油品质的下降, 双相不锈钢开始逐步应用于压力容器的制造。双相不锈钢的金相组织为铁素体相  $\alpha$  + 奥氏体相  $\gamma$ , 该类型钢既拥有奥氏体不锈钢韧性及焊接性较好的优点; 又因铁素体相的存在而具有较高的力学强度和耐氯离子腐蚀的特点<sup>[1-2]</sup>。双相不锈钢自 20 世纪 30 年代开发以来, 已发展到第三代, 第三代双相不锈钢的代表为 SAF2507 (称为超级双相不锈钢, DSS), 其抗点蚀指数 (*PRE*) 值

能达到 40, 具有较强的耐氯化物腐蚀能力<sup>[3-4]</sup>。近年来, UNS S32707 作为最新一代的双相不锈钢开始应用于产品的制造中, 其奥氏体相与铁素体相接近 1:1, *PRE* 值接近 50, 称为特超级双相不锈钢 (HDSS)。UNS S32707 具有极优的耐腐蚀性能, 且力学强度远大于一般奥氏体不锈钢及镍基合金, 在特定环境下可以代替某些镍基合金, 从而降低设备制造成本<sup>[5-6]</sup>, 具有广阔的应用前景。

国内已有较多文献报道了对 UNS S32707 特超级双相不锈钢的性能研究及产品制造<sup>[7]</sup>, 但尚无对该种材料堆焊试验的报道。在压力容器的制

造中,对某些较小部件要进行耐腐蚀、耐磨层的堆焊<sup>[8]</sup>,热丝 TIG 是在传统 TIG 基础上,焊丝在进入熔池前,开始由加热电源通过导电块对其通电,依靠电阻热将焊丝加热至预定温度,减小了焊接熔池从电弧中输入的热量,使得熔敷效率有了较大的提高<sup>[9-10]</sup>。因此,研究热丝 TIG 堆焊 UNS S32707 特超级双相不锈钢工艺及其堆焊层性能对该类材料在压力容器中的应用具有重要的意义。

## 1 试验材料及方法

堆焊试验母材为 12Cr2Mo1R,板材为正火 + 回火热处理,规格为 40 mm(厚度) × 300 mm × 300 mm;焊接前对待堆焊面进行打磨,清除表面油污,并进行磁粉检测(MT)确认无缺陷后堆焊;第 1 层堆焊前对母材试板进行预热,预热温度 ≥ 150 °C。焊接材料选用某公司 27.7.5L(∅1.2 mm),其化学成分如表 1 所示。

特超级双相不锈钢中 N 为重要元素之一,对双相不锈钢中两相比例、 $\gamma$  相耐腐蚀性都有重要

的作用<sup>[11-12]</sup>;虽然焊丝中含有一定量的 N 元素,但在焊接过程中容易发生 N 元素的烧损,所以在 UNS S32707 特超级双相不锈钢的堆焊试验中,如何保证堆焊层中 N 元素是需要重点关注的问题。在进行热丝 TIG 自动堆焊之前,为验证混合气中 N<sub>2</sub> 含量最佳比例,先采用手工 TIG 堆焊试验,选用不同 N<sub>2</sub> 含量的混合气体进行堆焊试验,测量熔敷金属 N 元素含量,结果表明,纯 Ar 保护焊接时 N 元素含量最低值为 0.2%,Ar(98%) + N<sub>2</sub>(2%) 混合气体保护焊接时 N 元素含量可以控制在 0.3% ~ 0.5% 之间,在热丝 TIG 堆焊时采用 Ar(98%) + N<sub>2</sub>(2%) 配比混合气。根据生产经验制定热丝 TIG 堆焊特超级双相不锈钢焊接工艺如表 2 所示,奥氏体不锈钢 309MoL 为过渡层,厚度 2 ~ 2.5 mm。

表 1 焊接材料 27.7.5L 化学成分

Tab.1 Chemical composition of the welding material 27.7.5L %

元素	C	Mn	Cr	Ni	Co	Mo	N
数值	0.015	0.91	26.95	6.51	0.99	4.73	0.379

表 2 热丝 TIG 堆焊 UNS S32707 焊接规范

Tab.2 Overlay welding process of hot wire TIG UNS S32707

层数	焊接材料	规格/mm	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/(mm · min <sup>-1</sup> )	道间温度/°C	保护气体
1	22.15.3.L	1.0	230 ~ 240	9.5 ~ 10.5	90	100 ~ 250	Ar
2	27.7.5L	1.2	240 ~ 260	9.5 ~ 10.5	90	15 ~ 100	Ar(98%) + N <sub>2</sub> (2%)
3	27.7.5L	1.2	240 ~ 260	9.5 ~ 10.5	90	15 ~ 100	Ar(98%) + N <sub>2</sub> (2%)
4	27.7.5L	1.2	240 ~ 260	9.5 ~ 10.5	90	15 ~ 100	Ar(98%) + N <sub>2</sub> (2%)

严格按照表 2 的焊接规范,控制堆焊过程中的搭接量、焊枪角度进行焊接,堆焊层外观美观、平整度较好,热丝 TIG 堆焊层外观如图 1 所示。

根据 NB/T 47013.3—2015《承压设备无损检测 第 3 部分:超声检测》及 NB/T 47013.5—2015《承压设备无损检测 第 5 部分:渗透检测》,对堆焊完成的试板进行检测,无缺陷。根据 GB/T 150.4—2011《压力容器 第 4 部分:制造、检验和验收》8.2 中的规定,一般在铬钼耐热钢上进行堆焊之后需要进行焊后热处理<sup>[13]</sup>,本次试验在堆焊完过渡层之后进行退火热处理。热处理参数

如表 3 所示。



图 1 热丝 TIG 堆焊层形貌

Fig.1 Hot wire TIG surfacing layer morphology

表 3 热处理工艺参数

Tab.3 Heat treatment process parameters

参数	起始温度/°C	升温速度/(°C · h <sup>-1</sup> )	恒温温度/°C	恒温时间/h	降温速度/(°C · h <sup>-1</sup> )	冷却方式
数值	≤400	≤75	690 ± 10	8	≤75	≤400 °C 后空冷

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 堆焊层熔敷金属化学成分

根据 GB/T 4336—2016《碳素钢和中低合金

表 4 表层熔敷金属化学成分

Tab. 4 Chemical composition of surface deposited metal

元素	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Co	Mo	Cu	N
数值	0.017	0.88	0.016	0.001	0.22	27.2	6.42	0.95	4.64	0.09	0.36

从表 4 可以看出,表层熔敷金属化学成分符合 ASME II 卷 A 篇 SA-789《一般用途无缝和焊接铁素体/奥氏体不锈钢管子》对化学成分的规定,说明在选用适当的保护气体、严格执行焊接规范的情况下,热丝 TIG 堆焊 27.7.5L 可得到 N 含量合格的堆焊层。将上述实测化学成分代入点蚀指数计算公式: $PRE = Cr\% + 3.3 \times Mo\% + 16 \times N\%$ , 得到堆焊层  $PRE = 48.2$ 。

### 2.2 堆焊层力学性能

对堆焊层进行了大小侧弯测试、熔合面剪切强度测试,试验结果:其中侧弯试样尺寸分别为 40 mm + 堆焊层 × 10(大侧弯)、40 mm + 堆焊层 × 3(小侧弯),弯曲直径分别为 40, 12 mm,弯曲角度 180°, 8 件侧弯在弯曲之后未发现 ≥ 3 mm 的裂纹,说明堆焊层塑性较好。堆焊层熔合面剪切强度分别为 569, 580 MPa, 该值远大于 GB/T 6396—2008《复合钢板力学及工艺性能试验方法》及制造技术条件中规定的值 200 ~ 210 MPa。

### 2.3 堆焊层金相性能

从堆焊试板上制取一块试样,对截面进行腐蚀,以便区分过渡层及表层、母材进行硬度测试,其中表层测试位置为截面 + 表面;测试标准为 GB/T 4340.1—2009《金属材料 维氏硬度试验 第 1 部分:试验方法》,测试结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出,UNS S32707 特超级双相不锈钢堆焊层硬度值远高于奥氏体不锈钢堆焊层硬度,这与其强度值较高相匹配。特超级双相不锈钢表层硬度值高于过渡层奥氏体不锈钢堆焊层的原因是金相组织的不同。

图 3 示出堆焊层表层的金相组织。可以看出,表层为奥氏体 + 铁素体双相组织,铁素体占据较大比例,约占 50%。焊接双相不锈钢时铁素体与奥氏体的相比比例是较为重视的问题,试验中采用金相法与磁性法分析。磁性法中,铁素体检测

钢多元素含量的测定 火花放电原子发射光谱法(常规法)》,对堆焊层熔敷金属进行化学成分分析,取样位置在表层 3 mm 位置处,表层化学成分如表 4 所示。

仪型号 FMP30,引用检测标准 GB/T 1954—2008《铬镍奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量测量方法》;金相法测定铁素体含量标准为 GB/T 13305—2008《不锈钢中 α-相面积含量金相测定法》。

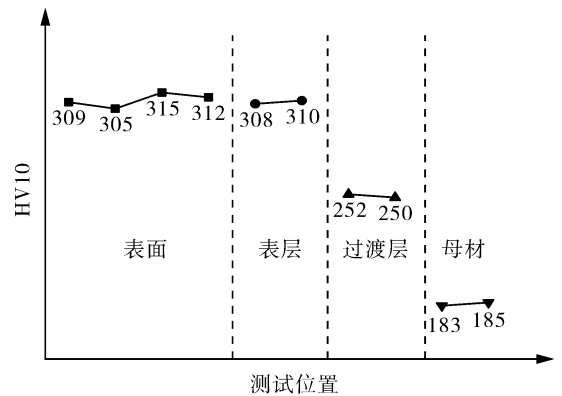


图 2 堆焊层接头硬度值

Fig. 2 Hardness value of surfacing layer joint

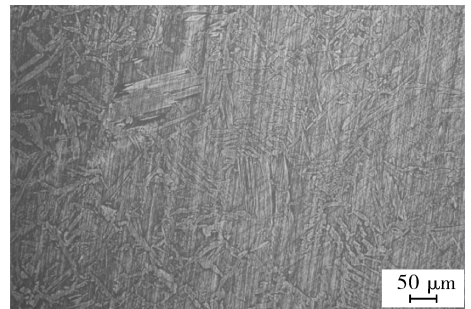


图 3 堆焊层表层金相组织

Fig. 3 Surface metallographic structure of surfacing layer

用 AWS A4.2 校准过的铁素体磁性测定仪测量堆焊表层铁素体数  $FN$ , 结果如图 4 所示。

选择表层 6 处位置进行铁素体数测量,结果为 52.1, 53.2, 50.2, 49.6, 51.4, 49.1, 铁素体数均值为 50.9。表层中奥氏体相与铁素体相接近 1:1, 与图 3 中表层微观金相组织相符合。

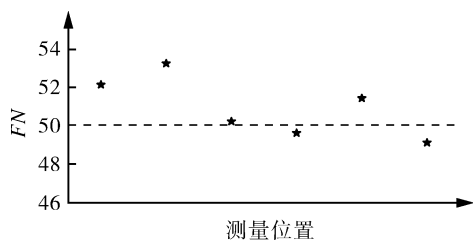


图4 表层铁素体数(FN)

Tab.4 Number content of surface ferrite (FN)

## 2.4 堆焊层耐腐蚀性能

对堆焊层表层金属进行取样,并进行晶间腐蚀试验、点腐蚀试验,试验标准为 GB/T 4334.5—2000《不锈钢硫酸-硫酸铜腐蚀试验方法》、ASTM G48—2011《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开腐蚀性试验的标准方法》。

(1)硫酸-硫酸铜晶间腐蚀试验时为微沸状态,经 16 h 试验之后对两件试样在 10 倍放大镜下观察,未见因晶间腐蚀引起的裂纹。

(2)在 ASTM G48 A/B 法试验中,试验温度均为  $50 \pm 2$  °C;两种试验方法  $\text{FeCl}_3$  质量浓度为 6%,试验时间为 72 h。试验结果为:A 法试验腐蚀率均值为  $0.0065 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ ,B 法试验腐蚀率为  $0.003 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ 。从上述数据可以看出,堆焊层具有良好的耐点蚀能力。

## 3 结语

热丝 TIG 是一种适合于 UNS S32707 特超级双相不锈钢堆焊效率较高的焊接方法,焊接成型美观、后续加工量小;在一定的焊接及热处理参数下,堆焊层化学成分、力学性能均符合相关技术要求,堆焊层微观组织中铁素体相占比约 50%;堆焊层具有优异的耐点蚀及裂口腐蚀性能。该材质堆焊具有较好的应用前景。

## 参考文献:

[1] 丰涵,周晓玉,刘虎,等. 特超级双相不锈钢的发展现状及趋势[J]. 钢铁研究学报,2015,27(4):1-5. FENG Han,ZHOU Xiaoyu,LIU Hu, et al. Development and trend of hyper duplex stainless steels[J]. Journal of Iron and Steel Research,2015,27(4):1-5.

[2] 吴玖. 双相不锈钢[M]. 北京:冶金工业出版社,1999.

WU Jiu. Duplex stainless steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,1999.

[3] 王刚,郭幼丹,郭雷,等. 双相不锈钢的发展、特点及其应用[J]. 科技与创新,2015(7):91-92. WANG Gang, GUO Youdan, GUO Lei, et al. Development of duplex stainless steel, characteristics and applications[J]. Technology and Innovation,2015(7):91-92.

[4] 康利梅. 双相不锈钢的发展及应用综述[J]. 科技广场,2010(8):165-168. KANG Limei. Review of development and application of duplex stainless steel[J]. Science and Technology Plaza,2010(8):165-168.

[5] 张彬彬,张树才,李志兴,等. 特超级双相不锈钢 S32707 在酸化海水中的钝化行为研究[J]. 冶金工程,2018,5(2):47-54. ZHANG Binbin, ZHANG Shucai, LI Zhixing, et al. Research on the passivation behavior of hyper duplex stainless steel S32707 in acidified seawater solution[J]. Metallurgical Engineering,2018,5(2):47-54.

[6] 刘富强,高杰,叶丙义. 变形量和固溶处理对 S32707 双相不锈钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理,2017,42(6):123-126. LIU Fuqiang, GAO Jie, YE Bingyi. Effects of deformation and solution treatment on microstructure and mechanical properties of S32707 duplex stainless steel[J]. Heat Treatment of Metals,2017,42(6):123-126.

[7] 张伟,陈崇刚,张建晓,等. 特超级双相不锈钢 UNS S32707 换热管胀接试验研究[J]. 压力容器,2020,37(7):14-18. ZHANG Wei, CHEN Chonggang, ZHANG Jianxiao, et al. Research on tube expanding of UNS S32707 super duplex stainless steel heat exchange tube[J]. Pressure Vessels Technology,2020,37(7):14-18.

[8] 张伟,朵元才,张建晓,等. 热丝 TIG 堆焊 Alloy 59 镍基合金工艺及其堆焊层性能研究[J]. 压力容器,2020,37(5):13-17. ZHANG Wei, DUO Yuancai, ZHANG Jianxiao, et al. Research on hot-wire TIG surfacing nickel-based Alloy 59 process and its surfacing properties[J]. Pressure Vessel Technology,2020,37(5):13-17.

[9] 吕世雄,孙清洁,范阳阳,等. 电弧热丝 TIG 焊工艺特点分析[J]. 焊接,2007(10):41-43. LYU Shixiong, SUN Qingjie, FAN Yangyang, et al. Analysis of characteristics of arc hot wire TIG welding process[J]. Welding,2007(10):41-43.

- vessel (1) [J]. Pressure Vessel Technology, 2015, 32(2):1-20.
- [6] 李伟,杨笑瑾,马东华. 镍基合金换热管分段式机械胀接试验[J]. 压力容器, 2015, 32(9):75-79.  
LI Wei, YANG Xiaojin, MA Donghua. Process test of sectional mechanical rolling on nickel-base alloy tube [J]. Pressure Vessel Technology, 2015, 32(9):75-79.
- [7] 孙志远,张茂龙,胡欢. 1000 MW 核电蒸汽发生器管子管板焊接[J]. 压力容器, 2016, 33(1):67-73.  
SUN Zhiyuan, ZHANG Maolong, HU Huan. Tube to tubesheet welding of 1000 MW nuclear power steam generator [J]. Pressure Vessel Technology, 2016, 33(1):67-73.
- [8] 吴义党,杨志鹏,张斌,等. 堆焊层缺陷对百万千瓦级蒸汽发生器管板封口焊质量的影响分析及处理[J]. 焊接, 2017(5):44-46.  
WU Yidang, YANG Zhipeng, ZHANG Bin, et al. Analysis and treatment of effect of cladding layer defects on seal welding quality of tube plate in 1000MW steam generator [J]. Welding & Joining, 2017(5):44-16.
- [9] 韩君,李国骥. 蒸汽发生器的研制[J]. 压力容器, 2014, 31(10):42-46.  
HAN Jun, LI Guoji. Manufacture of steam generator [J]. Pressure Vessel Technology, 2014, 31(10):42-46.

---

**作者简介:**王强(1989),男,工程师,生产制造部技术室主任,主要从事核电设备工艺开发及生产制造,通信地址:066206 河北省秦皇岛经济技术开发区(东区)动力路5号哈电集团(秦皇岛)重型装备有限公司, E-mail: 278027824@qq.com。

#### 本文引用格式:

- 王强. 高温气冷堆蒸汽发生器蒸汽出口连接管制造及难点分析[J]. 压力容器, 2021, 38(5):80-86.  
WANG Qiang. Manufacture and analysis of technical difficulties of HTR-PM steam exit connect piping [J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(5):80-86.

#### (上接第 25 页)

- [10] 鲍亮亮,王勇,韩涛,等. Q345E 热丝 TIG 焊接头微观组织与力学性能研究 [J]. 焊接, 2019(2):54-58.  
BAO Liangliang, WANG Yong, HAN Tao, et al. Microstructures and mechanical properties of Q345E jointwelded by hot wire TIG welding [J]. Welding & Joining, 2019(2):54-58.
- [11] 危志强,陈湘茹,仲红刚,等. N 含量对 Fe-21Cr-3Ni-1Mo-N 双相不锈钢组织的影响 [J]. 上海大学学报(自然科学版), 2018, 24(6):955-960.  
WEI Zhiqiang, CHEN Xiangru, ZHONG Honggang, et al. Effect of N content on microstructure of Fe-21Cr-3Ni-1Mo-N duplex stainless steel [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2018, 24(6):955-960.
- [12] 向红亮,黄伟林,刘东,等. N 含量对 29Cr 铸造超级双相不锈钢组织及性能的影响 [J]. 金属学报, 2010, 46(3):304-310.  
XIANG Hongliang, HUANG Weilin, LIU Dong, et al. Effects of N content on microstructure and properties of 29Cr casting super duplex stainless steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(3):304-310.
- [13] 王顺花,陈宜,张建晓,等. Inconel 625 合金堆焊管板退火过程中的组织和耐蚀性变化 [J]. 金属热处理, 2015, 40(12):22-27.  
WANG Shunhua, CHEN Yi, ZHANG Jianxiao, et al. Evolution of microstructure and corrosion resistance of Inconel 625 alloy surfacing tube-sheet during annealing [J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(12):22-27.

---

**作者简介:**王纯(1970),男,高级工程师,主要从事焊接材料及工艺研发,工程应用推广等工作,通信地址:150028 黑龙江省哈尔滨市松北区创新路 2077 号哈尔滨威尔焊接有限责任公司, E-mail: wch70wch@163.com。

#### 本文引用格式:

- 王纯,贾小斌,冯伟,等. 热丝 TIG 堆焊 UNS S32707 特超级双相不锈钢工艺试验研究 [J]. 压力容器, 2021, 38(5):22-25.  
WANG Chun, JIA Xiaobin, FENG Wei, et al. Experimental research on hot wire TIG overlay welding process of UNS S32707 super duplex stainless steel [J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(5):22-25.