

超级双相不锈钢S32750焊管焊接工艺及性能研究

唐爽, 崔冬, 胡星光, 刘文正, 杨弦, 彭盛军

湖南湘投金天新材料有限公司, 湖南 益阳

收稿日期: 2025年3月7日; 录用日期: 2025年4月7日; 发布日期: 2025年4月22日

摘要

以冷轧态超级双相不锈钢S32750带卷, 经成型后TIG焊接, 制备规格 $\phi 50.8 \times 0.89$ mm的焊管。在不同的热输入量及退火温度下, 制备焊管, 采用万能拉伸试验机、金相显微镜、三氯化铁腐蚀试验, 检测和分析力学性能、焊缝的形貌、宏观组织、耐腐蚀性能。最终确定焊接1.0 m/min, 焊接电流105 A、电压10.5 V、退火温度1050℃情况下, 焊管力学性能、焊缝组织、耐腐蚀性满足标准要求。

关键词

超级双相不锈钢, S32750, 焊接工艺

Study on Welding Process and Performance of Super Duplex Stainless Steel S32750 Welded Tube

Shuang Tang, Dong Cui, Xingguang Hu, Wenzheng Liu, Xian Yang, Shengjun Peng

Hunan Xiangtou Goldsky New Materials Co., Ltd., Yiyang Hunan

Received: Mar. 7th, 2025; accepted: Apr. 7th, 2025; published: Apr. 22nd, 2025

Abstract

The cold rolled super duplex stainless steel S32750 strip coils were formed and welded by TIG to produce $\phi 50.8 \times 0.89$ mm welded tubes. Under different heat input and annealing temperature, the

文章引用: 唐爽, 崔冬, 胡星光, 刘文正, 杨弦, 彭盛军. 超级双相不锈钢 S32750 焊管焊接工艺及性能研究[J]. 材料科学, 2025, 15(4): 735-741. DOI: 10.12677/ms.2025.154078

welded tube was prepared. Universal tensile testing machine, metallographic microscope and ferric chloride corrosion test were used to detect and analyze the mechanical properties, weld morphology, metallographic structure and corrosion resistance. Finally, the mechanical properties, weld microstructure and corrosion resistance of the welded pipe meet the requirements of the standard under the condition of welding current 105 A, voltage 10.5 V and annealing temperature 1050°C with a welding speed of 1.0 m/min.

Keywords

Super Duplex Stainless Steel, S32750, Welding Process

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

不锈钢在使用中,表面钝化形成铁、铬氧化物薄膜,从而具有较好的抗腐蚀性能。超级双相不锈钢 S32750,因其具有奥氏体和铁素体的双相组织,结合了奥氏体和铁素体的优点,具有强度高、抗冲击韧性好,耐点蚀和应力腐蚀性能优良等特点。其优异的耐氯离子点蚀性能,和成本优势,在一些高氯腐蚀环境可以替代镍基合金。在石油化工、制药、造纸、水处理等领域超级双相不锈钢的选用,提高设备使用寿命,降低设备成本,具有显著经济效益[1]-[3]。

S32750 超级双相不锈钢,在第二代双相不锈钢的基础上,进一步降低碳量(0.01%~0.02%),并且加入更高含量的 Cr、Mo、Ni 和 N 等合金化元素,提高可焊接性以及力学和耐局部腐蚀性能,因此称为第三代双相不锈钢。第三代双相不锈钢具有更高的耐点蚀抗力,因此又被称为超级双相不锈钢(SDSS),其耐点蚀当量(PREN)大于 40,以适应近海油气开发、化工、海水淡化等工业中更加苛刻的服役环境。高的合金元素以及 N 元素的增加使其具有优异的耐腐蚀性能(PREN > 40)且含 C 量极低具有良好的焊接性[4]。

对于超级双相不锈钢 S32750,在使用过程中,很多都需要用到焊接,其可焊接性能较好,但对焊接工艺参数控制要求较高[5]。超级双相不锈钢 S32750 焊接过程中,熔池液相凝固为铁素体相,随着温度降低,铁素体相中再析出奥氏体相组织[6] [7]。在过高或过低的热输入量情况下,都会导致焊接区域组织相比例失衡,降低其耐腐蚀性能,从而影响到最终设备的使用寿命[8] [9]。

对于薄壁超级双相不锈钢 S32750 焊管,自动钨极氩气保护焊(TIG 焊)其焊接控制精确,焊接过程较稳定,可以较好地应用于超级双相不锈钢焊接[10] [11]。焊接过程中焊缝熔池重新凝固,不可避免地会造成焊缝及热影响区奥氏体-铁素体两相比例的变化,直接影响了焊接接头在含氯离子环境下的耐腐蚀性能,因此通过研究焊接热输入量及焊后热处理工艺对其性能、组织、耐腐蚀性的影响,为生产应用提供依据。

2. 实验材料与方法

2.1. 试验材料

实验材料为浦项(张家港)不锈钢股份有限公司生产的 S32750 超级双相不锈钢,规格为 158.8×0.89 mm,冷轧 + 固溶态,其带材性能如表 1 所示,化学成分如表 2 所示,根据 PREN 值计算公式: $PREN = Cr\% + 3.3 \times Mo + 16 \times N\%$,母材 PREN 值为 41.4。制备工艺流程为:带材→清洗→剪切端焊→清洗→冷弯成形→焊接→一次定径→在线退火→二次定径/矫直。

Table 1. Tensile properties of the S32750**表 1.** S32750 力学性能

材料牌号	抗拉强度 MPa	屈服强度 MPa	断后伸长率 A50%	硬度 HRC
S32750	959	733	32	29.8

Table 2. Chemical compositions of S32750**表 2.** S32750 元素含量(wt%)

材料牌号	wt. %										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Cu	Fe
S32750	0.0138	0.535	0.864	0.0252	0.0005	25.578	6.193	3.406	0.00288	0.114	余量

2.2. 试验方法及设备

采用 JT50 焊管机, 焊接设备为米勒 MAXSTAR 700 焊机, 为防止焊接过程中环境对焊缝影响, 在焊缝背面(焊管内壁)、焊枪、焊合室内通氩气(纯度 $\geq 99.99\%$)进行保护。在 1.0 m/min 的速度下, 采用 TIG 直流正接法进行制样。在 1.0 m/min 速度下, 进行了焊管试制; 试样编号和试验工艺参数如下表 3 所示。

Table 3. Sample number and test process parameters**表 3.** 试样编号和试验工艺参数

序号	焊接速度	焊接电流	焊接电压	退火温度
	m/min	I/A	U/V	°C
1#	1	120	11	1050
2#	1	115	11	1050
3#	1	110	11	1050
4#	1	120	10.5	1050
5#	1	115	10.5	1050
6#	1	110	10.5	1050
7#	1	120	10.5	1010
8#	1	115	10.5	1010
9#	1	110	10.5	1010

采用 XJA-6A 金相显微镜对试样的母材、热影响区、焊缝区进行了金相组织观察。拉伸性能检测采用 CMT5105 型电子万能试验机(100KN), 硬度检测采用 THBRVP-187.5 e 型硬度计。

腐蚀试验和检测方法按照 ASTM G48 A 方法进行, 将试样切割成小块后, 进行称重后放入配置好的三氯化铁溶液中, 恒温 50℃, 24 h 后取出称重并观察试样表面腐蚀情况。

3. 试验结果与讨论

3.1. 力学性能分析

对制备样品进行拉伸及硬度测试, 结果如下表 4 所示, 相比于母材, 其抗拉强度、屈服强度有所降低, 硬度增加, 力学性能满足 ASTM A789 标准要求。

Table 4. Sample mechanical properties
表 4. 样品力学性能

样品编号	抗拉强度 MPa	屈服强度 MPa	断后伸长率 A50%	硬度 HRC
1#	891	670	35.5	30.3
2#	892	675	35	30.9
3#	902	686	32	31.2
4#	901	690	31	30.3
5#	894	693	35	30.6
6#	896	682	33.5	30.9
7#	891	675	33.5	30.9
8#	891	676	33.5	30.9
9#	898	681	35	30.6

3.2. 金相组织分析

图 1 为 1#~3# 样的焊缝、热影响区金相照片。金相组织中，基体组织为铁素体相，奥氏体相呈块状或片状分布在晶界和晶内。对比 1#、2#、3# 样金相组织，1# 焊缝区、热影响区内铁素体晶粒尺寸大，奥氏体相占比较少。高温热影响区保留了高温铁素体的原始晶粒形态，当热影响区从高温冷却下来，先是形成全铁素体，而后冷却过程中，在铁素体晶界上开始向奥氏体转变，随后在铁素体内部也有部分组织转变成板条状奥氏体[12]。在焊接热输入量大的情况下，热影响区中奥氏体转换为铁素体，铁素体晶粒长大，焊缝区由于热输入量大，铁素体基体晶粒长大，高温铁素体晶界比例小，奥氏体在晶界形核位置减少析出困难，尽管热输入提高有利于高温铁素体向奥氏体转变，但由于高温铁素体晶粒尺寸的长大，反而导致奥氏体在组织内的比例降低。

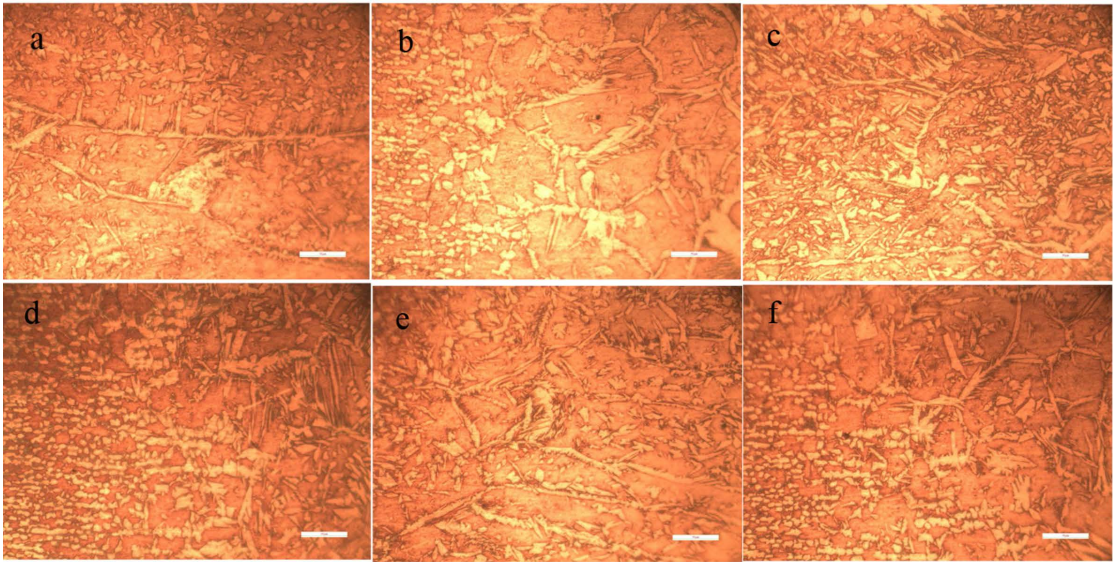


Figure 1. Weld zone, heat affected zone metallographic structure (a) 1# weld zone (b) 1# heat affected zone (c) 2# weld zone (d) 2# heat affected zone (e) 3# weld zone (f) 3# heat affected zone

图 1. 焊缝区、热影响区金相组织 (a) 1#样焊缝区 (b) 1#样热影响区 (c) 2#样焊缝区 (d) 2#样热影响区 (e) 3#样焊缝区 (f) 3#样热影响区

3.3. 腐蚀试验分析

按照腐蚀方法浸泡在三氯化铁溶液 24 h 取出后，进行称重。从外观上看，如图 2 所示其中 1#样品可以观察到在焊缝区域出现明显的腐蚀坑，2#、3#样品未出现可见腐蚀坑。

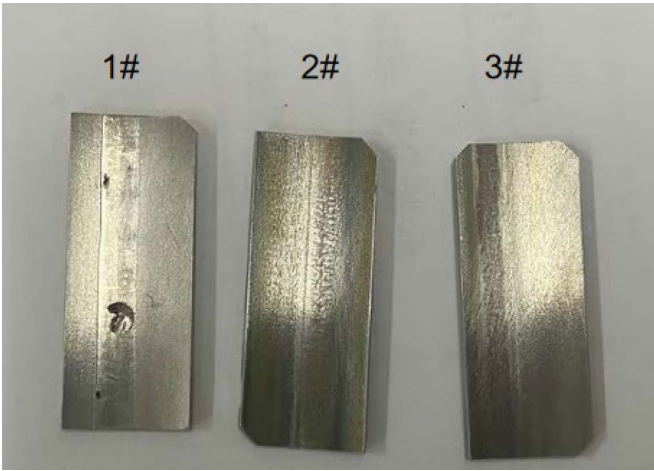


Figure 2. Sample surface after corrosion
图 2. 腐蚀后样品表面

对试样腐蚀前后重量进行对比，其结果如下表 5 所示。7#样腐蚀较严重，其减重量最大，6#样减重量最少。结合图 3 金相组织金相分析，因 7#样品热输入量大，焊缝处铁素体晶粒长大较为明显，铁素体相粗化。奥氏体沿晶界、晶内析出量较少，焊缝处奥氏体组织相比比例低。 σ 相是一种富含 Cr、Mo 的金属间化合物，一般在 600℃~1000℃温度范围内析出，被认为是双相不锈钢中危害性最大的一种硬脆相，少量的 σ 相析出即会导致接头韧性的急剧降低[13]。同时， σ 相析出会造成周围 Cr、Mo 等耐腐蚀性元素的贫乏，从而降低双相不锈钢的耐腐蚀性能。7#试样在焊后固溶处理中，其固溶温度 1010℃， σ 相未能完全溶解。在热输入量过高，固溶温度低情况下，导致其在三氯化铁溶液中，熔合线附近发生严重点蚀。

Table 5. Sample weight before and after corrosion test
表 5. 腐蚀试验前后试样重量

试样编号	试验前质量 g	试验后质量 g	减重 g
1#	1.6554	1.617	0.0384
2#	1.6333	1.6162	0.0171
3#	1.606	1.5905	0.0155
4#	1.6033	1.5681	0.0352
5#	1.6721	1.6639	0.0082
6#	1.6425	1.6352	0.0073
7#	1.6657	1.5635	0.1022
8#	1.6032	1.5219	0.0813
9#	1.6513	1.5761	0.0752

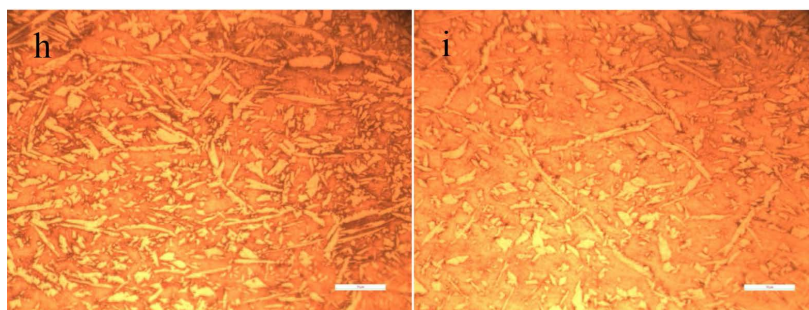


Figure 3. Weld zone metallographic structure (h) 6# weld zone (i) 7# weld zone

图3. 焊缝区金相组织 (h) 6#样焊缝区 (i) 7#样焊缝区

经过固溶后冷轧的双相不锈钢母材铁素体/奥氏体两相比例基本趋近平衡, 在固溶处理下无二次相的存在。但在焊接过程中, 由于接头冷却速度较快, 双相不锈钢焊缝通常存在奥氏体不足的缺点。同时, 双相不锈钢焊接过程中, 热影响区会遭受快速加热和冷却的复杂热循环作用而导致过多的铁素体形成和有害的金属间化合物(σ 相和 χ 相等)、氮化物(Cr_2N 和 CrN)以及碳化物等二次相析出, 严重恶化热影响区的韧性和耐局部腐蚀性能, 从而导致热影响区成为双相不锈钢焊接接头最薄弱区域[14]。

4. 结论

以冷轧 + 固溶态超级双相不锈钢 S32750 带卷, 经成型后 TIG 焊焊接, 在不同的热输入量及退火温度下, 制备规格 $\phi 50.8 \times 0.89 \text{ mm}$ 的超级双相不锈钢焊管。对其力学性能、组织、耐腐蚀性能进行研究。

(1) 在不同的焊接及热处理工艺下, 制备的焊管抗拉、屈服、延伸率、硬度等可以满足相应标准要求, 焊缝硬度比母材有所增加。

(2) 焊接过程中, 热影响区铁素体晶粒粗化, 奥氏体相不足, 同时由于有害的金属间化合物(σ 相和 χ 相等)、氮化物(Cr_2N 和 CrN)以及碳化物等二次相析出、导致焊缝热影响区处耐腐蚀性能变差。在热输入量增加的情况下, 焊缝、热影响区组织中奥氏体含量不断降低, 相应耐腐蚀性能变差。在焊后固溶处理中, 固溶温度 1010°C , 不能完全溶解 σ 相, 其耐点蚀性能降低, 1050°C 退火温度时, 超级双相不锈钢耐点蚀性能优于 1010°C 。因此, 热输入量的增加会导致铁素体晶粒粗化及奥氏体相比比例不足, 而过低的焊后固溶退火温度, 导致 σ 相不能完全溶解, 因此 7# 试样的耐腐蚀性能最差。

(3) 综合分析, 在焊接 1.0 m/min , 焊接电流 105 A 、电压 10.5 V 、退火温度 1050°C 情况下, 焊管力学性能、焊缝组织、耐腐蚀性满足标准要求, 且耐三氯化铁腐蚀性能最优。

参考文献

- [1] 叶益民, 马伟民, 张应龙, 等. 不同保护气体下的超级双相不锈钢焊接工艺研究[J]. 焊接技术, 2016, 45(1): 39-42.
- [2] Chacón-Fernández, S., Portolés García, A. and Román Labanda, G. (2022) Influence of Parameters on the Microstructure of a Duplex Stainless Steel Joint Welded by a GMAW Welding Process. *Progress in Natural Science: Materials International*, 32, 415-423. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2022.06.003>
- [3] 赵钧良. 双相不锈钢铁素体含量控制及耐腐蚀性能的研究[J]. 上海钢研, 2005(2): 20-23.
- [4] 楚昊然. UNS S32750 双相不锈钢焊接热影响区组织演变规律与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 中国民航大学, 2023.
- [5] 李国平, 柳阳, 王立新, 等. 热输入对 S32750 超级双相不锈钢 TIG 焊接接头腐蚀性能的影响[J]. 焊接, 2018(9): 44-46.
- [6] 易忠烈, 陈兴润, 魏海霞, 等. 冷却速率对 2507 超级双相不锈钢 σ 相析出的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(2): 17-20.
- [7] Pinheiro, F.W., Menezes de Souza, L., Pereira, E.C., Monteiro, S.N. and Azevedo, A.R.G. (2023) Effect of Solubilization

- Heat Treatment on Microstructure and Corrosion Resistance of Joints Welded with the Autogenous TIG Process Duplex Stainless Steel. *Journal of Materials Research and Technology*, **26**, 1527-1536. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.014>
- [8] Wang, Q., Gu, G., Jia, C., Li, K. and Wu, C. (2023) Investigation of Microstructure Evolution, Mechanical and Corrosion Properties of SAF 2507 Super Duplex Stainless Steel Joints by Keyhole Plasma Arc Welding. *Journal of Materials Research and Technology*, **22**, 355-374. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.107>
- [9] 洪巨锋. 双相不锈钢 2304 与 2507 焊缝局部腐蚀电化学研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 复旦大学, 2013.
- [10] 黄洲扬. 31803 双相不锈钢 TIG 焊接工艺参数优化[J]. 机械制造与智能化, 2024(32): 41-44.
- [11] 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(7): 15-18.
- [12] 文超. 2205 双相不锈钢成分及 TIG 焊焊接工艺对焊接接头耐点蚀性能的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- [13] Nilsson, J., Kangas, P., Wilson, A. and Karlsson, T. (2000) Mechanical Properties, Microstructural Stability and Kinetics of σ -Phase Formation in 29Cr-6Ni-2Mo-0.38N Superduplex Stainless Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **31**, 35-45. <https://doi.org/10.1007/s11661-000-0050-1>
- [14] Kang, D.H. and Lee, H.W. (2013) Study of the Correlation between Pitting Corrosion and the Component Ratio of the Dual Phase in Duplex Stainless Steel Welds. *Corrosion Science*, **74**, 396-407. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.04.033>