

制造技术

文章编号: 1000-7466(2024)06-0052-04

双相不锈钢 S22053 埋弧焊焊接接头 组织和性能研究

俞禄沅, 杨有福, 张佳杰, 曹 洋, 刘永杰, 曹 鑫

(甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 双相不锈钢埋弧焊焊接工艺在压力容器制造中未得到有效的开发和使用。分析了双相不锈钢的焊接性, 对双相不锈钢 S22053 埋弧焊焊接接头的化学成分、组织及性能进行了试验研究。研究表明, 采用埋弧焊焊接工艺, 通过控制焊接线能量和层间温度保证两相比比例, 可确保焊接接头具有优良的各项性能, 达到焊接工艺评定及使用要求。

关键词: 双相不锈钢; 埋弧焊; 两相比比例; 线能量; 组织; 性能

中图分类号: TG445

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1000-7466.2024.06.009

Research on Microstructure and Performance of Submerged Arc Welding Joint of Duplex Stainless Steel S22053

YU Lu-yuan, YANG You-fu, ZHANG Jia-jie, CAO Yang, LIU Yong-jie, CAO Xin

(Lanpec Technologies Limited, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The submerged arc welding technology of duplex stainless steel has remained underdeveloped and underutilized in the field of pressure vessel manufacturing. This study examines the weldability of duplex stainless steel, investigating the chemical composition, microstructure, and properties of submerged arc welding joints in duplex stainless steel S22053 through experimental analysis. The findings of the research demonstrate that the submerged arc welding process can guarantee the exceptional characteristics of the welded joints by regulating the energy of the welding line and the temperature of the interlayer to guarantee the two-phase ratio, thus fulfilling the criteria for the evaluation of the welding process and its subsequent utilization.

Key words: duplex stainless steel; submerged arc welding; two-phase ratio; line energy; microstructure; performance

双相不锈钢组织由铁素体和奥氏体组成, 其不仅具有铁素体不锈钢强度高、塑性好等特点, 也具有奥氏体不锈钢良好的韧性、焊接性和耐腐蚀性。自 20 世纪 30 年代被开发以来, 双相不锈钢在石油、化工、海洋工程、船舶以及核电工程等领

域得到了广泛应用。众多学者对双相不锈钢焊接开展了广泛研究^[1-3], 但双相不锈钢 S22053 制压力容器的埋弧焊(SAW)焊接工艺一直未得到有效的开发和使用。文中对 S22053 的 SAW 焊接接头组织及各项性能进行试验研究, 以期对 S22053

收稿日期: 2024-06-12

作者简介: 俞禄沅(1993-), 男, 甘肃兰州人, 助理工程师, 学士, 主要从事压力容器焊接及热处理工艺工作。

的生产及焊接质量控制加以指导。

1 双相不锈钢焊接性分析

与纯奥氏体不锈钢相比,双相不锈钢焊后具有较低的热裂倾向。与纯铁素体不锈钢相比,双相不锈钢焊后具有较低的脆化倾向,且焊接热影响区粗化程度较低,因此具有良好的焊接性。但双相不锈钢中存在较大比例的铁素体,铁素体钢所固有的脆化倾向(如 475 °C 脆性、 σ 相析出脆化和晶粒粗化)依然存在,只是因奥氏体的平衡作用而有一定程度的改善。双相不锈钢 S22053 的主要成分为 Cr、Ni、Mo 和 N,焊接时,随着温度的升高,奥氏体逐步熔化结晶为 100% 的铁素体。在随后的冷却过程中,部分铁素体向奥氏体转变,但由于焊接热循环较短,往往来不及发生奥氏体的析出,导致焊缝金属中铁素体占比较大。因此,双相不锈钢焊接的关键是平衡 δ 相与 γ 相的双相组织比例^[4]。

Cr 在 δ 相中的含量高于在 γ 相中的,敏化温度作用下 C 和 Cr 都向晶间扩散,C 的扩散速度快,冲过相界进入 δ 相,在 δ 相内部形成 Cr 的碳化物,而 Cr 在 δ 相内的扩散速度快,不会形成贫 Cr 层,特别是不会形成晶间贫 Cr 层。 δ 相可以打乱焊缝柱状晶,细化晶粒,避免贫 Cr 层贯穿于晶粒之间形成腐蚀通道, δ 相的增多可以提高金属耐晶间腐蚀性能。因此,双相不锈钢焊接接头的奥氏体和铁素体比例是决定焊接接头各项性能的关键。

2 S22053 焊接接头性能试验材料及工艺

2.1 试验材料

试验母材选用太原钢铁(集团)现货销售有限公司生产的 S22053 双相不锈钢热轧板,板材厚 26 mm。以等强匹配为原则,焊接材料选用 ER2209 焊丝 + SJ676 焊剂。母材和焊丝的化学成分见表 1,室温力学性能见表 2。

表 1 母材和焊丝化学成分(质量分数)

材料	元素								
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	N
母材 S22053	0.023	1.09	0.029	0.001	0.60	5.60	22.41	3.15	0.15
焊丝 ER2209	0.018	1.49	0.018	0.001	0.50	8.63	23.24	3.05	0.15

表 2 母材和焊丝室温力学性能

材料	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度/HBW
母材 S22053	570	765	30	241
焊丝 ER2209	—	760	30	—

2.2 焊接工艺试验

2.2.1 焊前准备

焊前采用砂轮将试板坡口两侧约 20 mm 范围内的油污、铁锈等杂质清理干净,并检查坡口表面。坡口表面应平整,无裂纹、夹杂物等缺陷。根据双相不锈钢焊接经验,选用双 V 型坡口,见图 1。

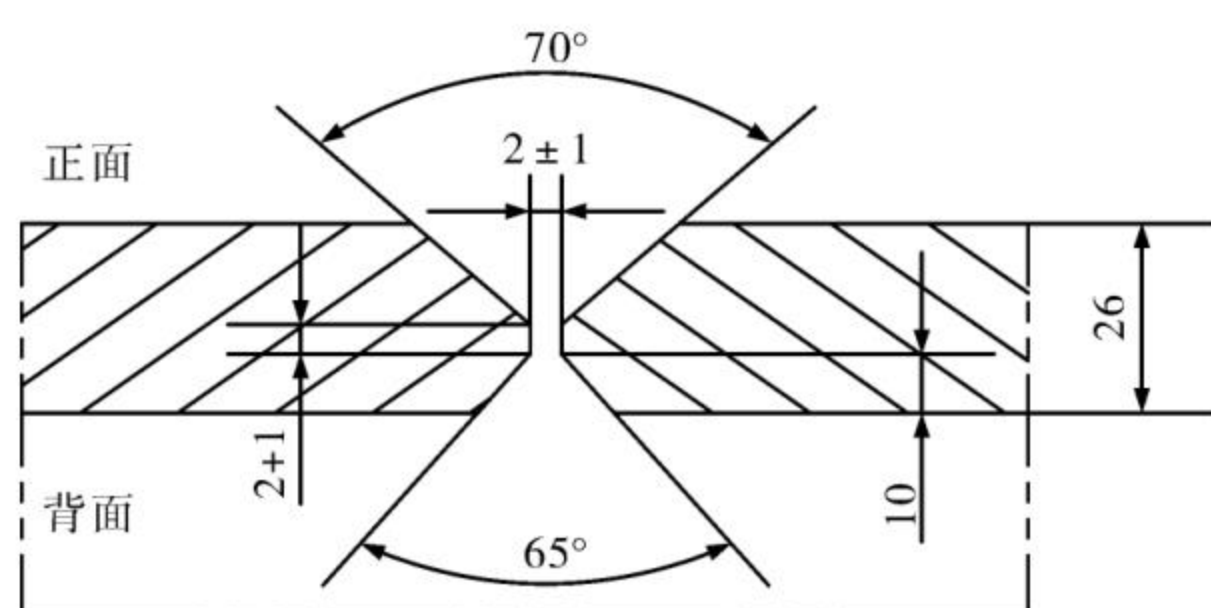


图 1 S22053 焊接试板坡口形式

2.2.2 焊接工艺参数

在焊接热循环作用下,双相不锈钢焊缝及热影响区都会发生相变,从而影响焊接接头的组织和性能。SAW 焊接线能量通常在 0.5~2.5 kJ/cm。若焊接线能量过小,则焊缝冷却速度过快,焊缝及热影响区中将形成过多的铁素体和氮化物,降低焊接接头的耐腐蚀性和冲击韧性。若焊接线能量太大,则焊缝冷却速度过慢,焊缝及热影响区会产生过多的奥氏体组织,引起热影响区的铁素体晶粒长大以及 σ 相等有害金属相的析出,造成接头脆化。此外,焊接时高温停留时间长,会析出金属间相,降低焊接接头的耐腐蚀性和韧性。

为了避免上述情况的发生,最佳的措施是控制焊接线能量和层间温度,并使用填充金属。对

S22053 焊接试板进行 SAW 平焊, 电源直流反接, 焊接材料为 $\phi 4.0$ mm 的 ER2209 焊丝 + SJ676 焊剂, 先焊接正面, 后焊接背面, 正面、背面焊接的工艺参数相同, 均为焊接电流 450~500 A、焊接电压 28~32 V、焊接速度大于等于 500 mm/min、层间温度小于等于 150 °C、焊接线能量为 1.92 kJ/cm。

3 S22053 焊接接头组织性能试验结果及分析

3.1 外观及无损检测

对 S22053 试板焊缝进行外观检查, 表面无裂纹、凹坑、咬边、气孔、夹渣及未熔合等缺陷。

对 S22053 试板焊缝及部件进行渗透检测和射线检测, 焊缝质量均符合 NB/T 47013.5—2015《承压设备无损检测 第 5 部分 渗透检测》^[5]、NB/T 47013.2—2015《承压设备无损检测 第 2 部分 射线检测》^[6] 中 I 级合格标准。

3.2 拉伸试验

依据 NB/T 47014—2011《承压设备焊接工艺评定》^[7], 将试板焊缝余高打磨至与母材齐平, 制作 2 件拉伸试样进行全厚度拉伸试验。2 件试样均断裂于母材, 说明焊接接头抗拉强度高于母材, 测得试样的抗拉强度分别为 813 MPa、790 MPa, 均大于 GB/T 24511—2017《承压设备用不锈钢和耐热钢钢板和钢带》^[8] 中的要求值 620 MPa。

3.3 弯曲试验

依据 NB/T 47014—2011, 将试板焊缝余高打磨至与母材齐平, 制作 4 件弯曲试样进行侧弯试验, 弯心直径为 40 mm, 弯曲角度为 180°, 4 件弯曲试样表面均无裂纹。

3.4 冲击试验

依据 NB/T 47014—2011 对焊接试板进行 -40 °C 冲击试验, 试验结果见表 3。

表 3 S22053 焊接试板 -40 °C 冲击试验结果

取样位置	冲击功 KV_2/J
焊缝中心	70.5, 63.5, 79.5
热影响区	67.0, 57.5, 56.0
母材	71.5, 88.5, 106.5

按 ASTM A923—2014《检测奥氏体-铁素体双相不锈钢中有害金属间相的标准试验方法》^[9] 中的试验方法 B, 双相不锈钢组织分类的夏比冲击试验冲击功要求值为母材 54 J、热影响区 54 J、焊缝 34 J。从表 3 数据看出, 焊接试板焊缝、热影响区以及母材的 -40 °C 冲击功大于等于 56 J, 满足 ASTM A923—2014 要求。

3.5 金相组织检验

依据 GB/T 13298—2015《金属显微组织检验方法》^[10] 对 S22053 焊接试板进行金相显微组织检验, 测得焊缝、热影响区及母材的金相组织均为奥氏体加铁素体, 见图 2。

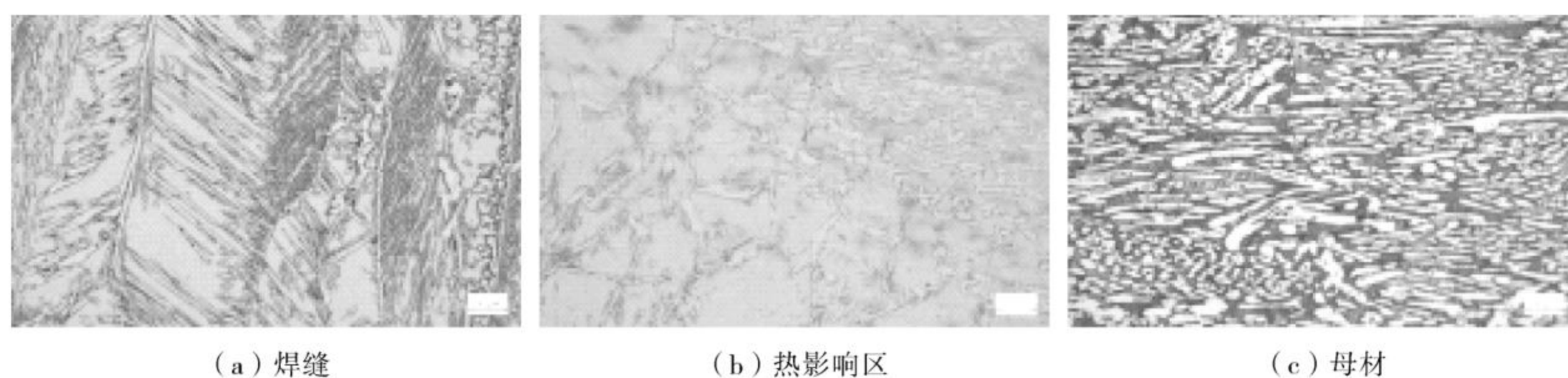


图 2 S22053 焊接试板金相显微组织 (200×)

依据 GB/T 1954—2008《铬镍奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量测量方法》^[11] 检测焊缝、热影响区及母材的铁素体含量, 依据 GB/T 4340.1—2009《金属材料 维氏硬度试验 第 1 部分: 试验方法》^[12] 检测焊缝、热影响区、母材的维氏硬度, 结果见表 4。由表 4 数据可以看出, 焊接接头铁素体含量在 44.4%~60.2%, 分布较适中。S22053 焊接接头微观组织一般由铁素体和奥氏体组成, 焊接接头性能取决于这 2 种组织的含量与分布。铁素

体含量过高会使焊接接头的硬度增高, 脆性增大, 易引起裂纹和变形。铁素体含量过低则可能导致焊接接头的强度和耐腐蚀性能降低, 双相不锈钢组织中奥氏体和铁素体分布越均匀, 冲击韧性越好, 耐腐蚀性能越好。

3.6 化学成分分析

依据 GB/T 223 系列标准对 S22053 焊接试板焊缝中心进行化学成分分析, 结果见表 5。表 5 数据表明, 焊缝中心化学成分接近 GB/T 24511—

表4 S22053 焊接试板铁素体含量及硬度检测结果位置

位置	铁素体含量/%	硬度/HV10
焊缝	正面:53.1,49.3,53.1,47.4,44.4,49.7	281,283,281
	正面向下 2 mm:51.5,53.1,57.4,56.0,56.8,55.2	
	反面:51.7,45.4,45.3,44.6,45.1,49.4	
	反面向下 2 mm:56.4,51.0,50.0,55.7,58.2,60.2	
热影响区母材	—	271,267,268
	53.1,49.3,53.1,47.4,44.4,49.7	271,266,269

表5 S22053 焊接试板焊缝中心化学成分分析结果(质量分数)

元素	C	S	Mn	Si	P	Cr	Ni	Mo	Cu	N
分析值	0.02	0.007	1.09	0.51	0.018	22.20	6.47	3.18	0.07	0.13
标准值 ^[8]	0.03	0.015	2.00	1.00	0.015	22.0~23.0	4.5~6.5	3.0~3.5	—	—

2017 中钢板化学成分要求。

3.7 抗腐蚀试验

依据 ASTM A923—2014 方法 C 对 3 件试样进行点蚀试验,3 件试样在 22 °C、6%(质量分数) FeCl₃ 溶液中经 24 h 试验后的最大腐蚀速率为 8.86 mg/(dm·d), 平均腐蚀速率 7.96 mg/(dm·d), 小于 ASTM A923—2014 中规定的腐蚀速率标准值 10 mg/(dm·d)。

依据 ASTM G48-11—2015 《用氯化铁溶液测定不锈钢和相关合金点状腐蚀和缝隙腐蚀的试验方法》^[13] 中的方法 A 对 3 件试样进行腐蚀试验,3 件试样在 22 °C、6%(质量分数) FeCl₃ 溶液中经 72 h 试验后的最大腐蚀速率为 0.026 g/(m²·h), 平均腐蚀速率为 0.022 g/(m²·h), 小于 ASTM G48-11—2015 中的标准值 4 g/(m²·h)。

3.8 氯化物应力腐蚀试验

依据 YB/T 5362—2006 《不锈钢在沸腾氯化镁溶液中应力腐蚀试验方法》^[14] 进行氯化物应力腐蚀试验,3 件试样在 143 °C(沸腾)、84.5 kPa、42%(质量分数)的 MgCl₂ 溶液中经过 96 h 加载 360 MPa 试验后用 10 倍放大镜观察,均无裂纹。

4 结束语

采用 SAW 对双相不锈钢 S22053 进行焊接,并对焊接接头组织及性能进行试验研究。结果表明,S22053 焊接接头焊缝中心化学成分满足相关标准要求,焊缝、热影响区及母材的组织均为奥氏体加铁素体,焊接接头铁素体含量在 44.4%~60.2%。拉伸、弯曲、冲击、抗腐蚀和氯化物应力腐蚀试验结果证明,S22053 焊接接头具有良好的力学性能和耐腐蚀性能。

采用 SAW 焊接双相不锈钢时,必须选用合格的焊接材料,采用适当的焊接工艺参数,严格控制焊接线能量、层间温度,才能获得力学性能及耐腐蚀性能合格的焊接接头。

参考文献:

- [1] 李小陶,刘俊伟,刘文博.压力容器用双相钢封头试板失效分析[J].化工设备与管道,2014,51(5):16-18.
- [2] 崔卫则,李青,郭帅,等.双相钢埋弧焊焊接接头组织性能研究[J].航天制造技术,2020(3):40-42,46.
- [3] 杨莉,王苍.双相钢 S31803 埋弧焊焊接接头组织和性能测试分析[J].热加工工艺,2010,39(13):158-160.
- [4] 刘会杰.焊接冶金与焊接性[M].北京:机械工业出版社,2016:204.
- [5] 承压设备无损检测 第 5 部分 渗透检测:NB/T 47013.5—2015[S].
- [6] 承压设备无损检测 第 2 部分 射线检测:NB/T 47013.2—2015[S].
- [7] 承压设备焊接工艺评定:NB/T 47014—2011[S].
- [8] 承压设备用不锈钢和耐热钢钢板和钢带:GB/T 24511—2017[S].
- [9] 检测奥氏体-铁素体双相不锈钢中有害金属间相的标准试验方法:ASTM A923—2014[S].
- [10] 金属显微组织检验方法:GB/T 13298—2015[S].
- [11] 铬镍奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量测量方法:GB/T 1954—2008[S].
- [12] 金属材料 维氏硬度试验 第 1 部分:试验方法:GB/T 4340.1—2009[S].
- [13] 用氯化铁溶液测定不锈钢和相关合金点状腐蚀和缝隙腐蚀的试验方法:ASTM G48-11—2015[S].
- [14] 不锈钢在沸腾氯化镁溶液中应力腐蚀试验方法:YB/T 5362—2006[S].

(张编)