

船用 LNG 储罐高锰奥氏体低温钢埋弧焊焊丝 焊剂 CHW-SMn/CHF610 的研制

* 杨飞¹ 张毅^{1*} 段然¹ 白昶¹ 毛兴贵¹ 罗宏² 陈雪丹²

(1. 四川大西洋焊接材料股份有限公司 四川 643000

2. 四川轻化工大学 四川 643000)

摘要: 通过实验研制了一种 -196 °C 超低温船用 LNG 储罐高锰奥氏体低温钢埋弧焊焊丝焊剂 CHW-SMn (φ 4.0) /CHF610, 焊剂为氟碱型 CaF₂-CaO-MgO-Al₂O₃ 渣系, 碱度 B_{IIW} 在 2.5 ~ 3.5。该焊丝焊剂组合具有优良的焊接工艺性能, 焊接电弧稳定, 焊缝脱渣容易, 焊缝成形美观。该焊丝焊剂组合焊缝金属力学性能稳定, 屈服强度 516 MPa、抗拉强度 735 MPa、延伸率 49.5%, -196 °C 冲击功 KV₂ 均值为 125 J, 且杂质含量低, 具有良好的抗裂纹性能, 完全满足超低温高锰钢 LNG 储罐焊缝金属的要求。

关键词: 高锰奥氏体低温钢; 焊丝焊剂; 焊接材料; 冲击韧性

中图分类号: TG42 **文献标识码:** A

DOI: 10.20087/j.cnki.1672-8114.2024.21.027

Development of Submerged Arc Welding Wire Flux CHW-SMn/CHF610 for High Manganese Austenitic Low Temperature Steel for Marine LNG Storage Tank

Yang Fei¹, Zhang Yi^{1*}, Duan Ran¹, Bai Chang¹, Mao Xingguo¹, Luo Hong², Chen Xuedan²

(1. Atlantic China Welding Consumables, INC, Sichuan, 643000

2. Sichuan University of Science and Engineering, Sichuan, 643000)

Abstract: A flux CHW-SMn(φ4.0)/CHF610 for submerged arc welding of high manganese austenitic low temperature steel in -196 °C ultra-low temperature marine LNG storage tank was developed. The flux was a fluorine-alkali CaF₂-MgO-CaO-Al₂O₃ slag system, and the basicity B_{IIW} was 2.5~3.5. The welding wire and flux combination has excellent welding process performance, stable welding arc, easy slag removal from the weld, and beautiful weld formation. The welding wire flux combination has stable mechanical properties of the weld metal, with a yield strength of 516 MPa, tensile strength of 735 MPa, elongation of 49.5%, and an average impact energy KV₂ of 125 J at -196 °C. It also has low impurity content and good crack resistance, fully meeting the requirements of weld metal for ultra-low temperature high manganese steel LNG storage tanks

Key words: high manganese austenitic low temperature steel; welding wire flux; welding materials; impact toughness

高锰奥氏体钢作为经济型低温钢材料, 具有良好的组织稳定性和低温强韧性^[1]。与 9Ni 钢相比, 高锰奥氏体低温钢采用 Mn 代替 Ni, 并加入一定量的 C 促进奥氏体的形成, 保证了低温韧性。高锰奥氏体低温钢可作为第二代 LNG 储罐用材^[2]。

高锰钢合金含量高、浇注温度低、易偏析、低温变形抗力大^[3-5], 导致冶炼、轧制生产难度大, 目前极少数国家掌握其生产技术。为推进高锰钢研发, 工信部成立重大专项, 由中国船舶重工集团牵头, 联合多家研究所和企业, 形成研发应用平台。其中, 四川大西洋焊接材料股份有限公司承担了中船用 LNG 储罐高锰奥氏体低温钢配套焊接材料的研究, 开发了一种超低温船用 LNG 储罐高锰奥氏体低温钢埋弧焊焊丝焊剂 CHW-SMn/CHF610。

1. 焊丝成分设计

CHW-SMn 焊丝 (φ 4.0) 化学成分见表 1。

2. 焊剂成分设计

(1) 渣系选择。根据高锰奥氏体低温钢埋弧焊焊缝性能的要求, 结合焊丝成分, 焊剂设计为 CaF₂-CaO-MgO-Al₂O₃ 渣系。氟碱型烧结焊剂中, 氧易与熔渣中的 Mn、Si 结合, 减少了其他合金成分的烧损。同时, 较高的碱性氧化物易与焊缝 S、P 元素结合, 使焊缝金属具有良好的抗热裂纹性^[6]。

(2) 焊剂碱度。焊剂碱度越大, 焊缝含氧量越低, 夹渣物就越多, 低温冲击就越高。通过焊接工艺与力学性能的综合考虑, 控制碱度 (B_{IIW}) 在 2.5~3.5, 确保焊丝焊剂组合具有良好的焊接工艺性能和优异的低温冲击韧性。

表 1 化学成分 (质量分数/%)

| 元素 | C | Mn | Si | S | P | Cr | Ni | Mo | V | Cu | N | Al |
|-----|------|-------|------|--------|-------|------|------|------|-------|------|------|-------|
| 实测值 | 0.33 | 24.68 | 0.36 | 0.0053 | 0.007 | 3.97 | 6.71 | 3.74 | 0.092 | 0.42 | 0.15 | 0.001 |

表 2 焊剂化学成分 (质量分数/%)

| 类别 | CaF ₂ | CaO | MnO | MgO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | 合金剂 | 其他 |
|----|------------------|---------|-------|---------|------------------|--------------------------------|------------------|-------------------|-------|-------|
| 范围 | 25 ~ 35 | 10 ~ 25 | 2 ~ 3 | 20 ~ 30 | 10 ~ 20 | 10 ~ 20 | 2 ~ 5 | 2 ~ 4 | 1 ~ 6 | 1 ~ 2 |

表 3 焊接参数

| 焊接方法 | SAW | 焊材规格 | Φ4.0 | 焊接电流/A | 450 ~ 500 | 焊接电压/V | 30 ~ 32 | 焊接速度/(cm/min) | 38 ~ 45 | 道间温度/℃ | 230 ~ 250 | 电流极性 | DCEN | 焊接设备型号 | ZD5-1000 型 |
|------|-----|------|------|--------|-----------|--------|---------|---------------|---------|--------|-----------|------|------|--------|------------|
|------|-----|------|------|--------|-----------|--------|---------|---------------|---------|--------|-----------|------|------|--------|------------|

表 4 熔敷金属化学成分 (质量分数/%)

| 元素 | C | Mn | Si | S | P | Cr | Ni | Mo | V | Cu | N | Al |
|-----|-----------|-------------|-------|---------|---------|--------|--------|--------|------|------|------|--------|
| 标准值 | 0.2 ~ 0.6 | 10.0 ~ 25.0 | ≤ 1.0 | ≤ 0.015 | ≤ 0.020 | ≤ 10.0 | ≤ 15.0 | ≤ 10.0 | - | - | - | - |
| 一例 | 0.50 | 25.15 | 0.63 | 0.0002 | 0.0049 | 2.40 | 6.74 | 3.98 | 0.17 | 0.33 | 0.14 | 0.0011 |

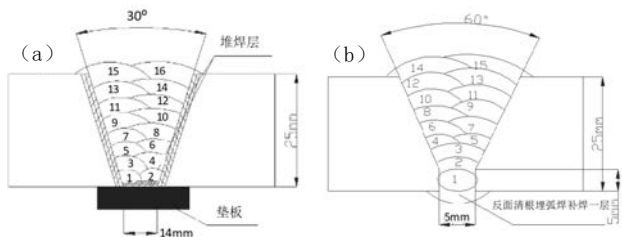
(3) 焊剂成分。根据焊剂碱度,合理匹配电熔镁砂、萤石、氧化铝等原材料,保证焊剂碱度的同时,对熔池进行渣保护。例如, CaO 起平衡焊剂酸碱度、改善焊缝成形和造渣作用^[7]。钾长石起造渣、稳定电弧的作用。MgO 提高熔渣的碱度,增加焊渣的透气性和表面张力。CaF₂ 防止氢气孔生成^[8]。Al₂O₃ 调整熔渣黏度、改善焊道表面抗氧化性并维持良好焊道形状^[9]。CHF610 配方见表 2。

3. 试验方法

(1) 焊接。应用 CHW-SMn/CHF610 进行组合焊接,焊剂为 CaF₂-MgO-CaO-Al₂O₃ 渣系 (B_{IIW}=2.8),埋弧焊接参数见表 3。

① a 试板,熔敷金属试板,母材为碳钢板 (δ=25mm),开坡口用高锰奥氏体低温钢焊条 CHE680TS (Φ3.2) 进行堆边三层,装焊垫板后根部堆边两层,见图 1 (a)。

② b 试板,高锰钢 (δ=25mm) 母材接头试板,见图 1 (b)。固定 CHW-SMn 焊丝的成分,通过合金粉添加合金元素,调整完成后,进行埋弧焊接。



(a) a 试板焊接图; (b) b 试板焊接图
图 1 试板坡口示意图

(2) 检测。测量焊缝金属化学成分、力学性能及 -196℃ 低温冲击性能等。

4. 试验结果

(1) 焊接工艺性能。焊缝表面形貌见图 2。由图 2 可知,渣壳能自动脱落,焊缝脱渣性优良,焊缝表面

光亮、成形美观,焊缝与母材过渡平滑,焊接工艺性能良好。

(2) 熔敷金属化学成分。CHW-SMn/CHF610 熔敷金属化学成分见表 4。Mn 的含量与母材 Mn 的含量相当,能够保证焊缝与母材为相同成分体系。熔敷金属中氮元素在质量分数为 0.13%~0.15% 时,起固溶强化作用。

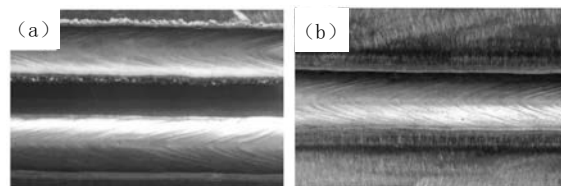
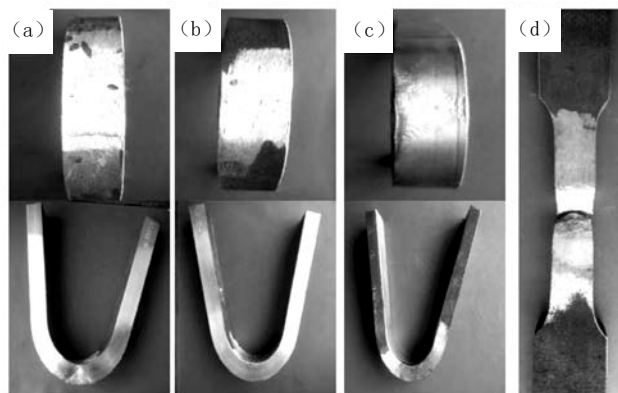


图 2 焊接时焊缝成形与脱渣

(3) 熔敷金属力学性能。焊缝熔敷金属力学性能见表 5。屈服强度 516 MPa,抗拉强度 735 MPa,延伸率 49.5%; -196℃ 冲击功 KV₂ 均值为 103 J。

表 5 熔敷金属力学性能

| | 抗拉强度 Rm/MPa | 屈服强度 ReL/MPa | 断后伸长率 A/% | -196℃ 冲击功 KKV ₂ /J |
|-----|----------------|-----------------|--------------|----------------------------------|
| 标准值 | ≥ 660 | ≥ 400 | ≥ 25 | 平均值 ≥ 41 |
| 一例 | 735 | 516 | 49.5 | 131; 122; 122 |



(a) 面弯试样; (b) 背弯试样; (c) 横向侧弯试样; (d) 板拉试样
图 3 接头弯曲和拉伸试样

表 6 焊接接头弯曲性能

| | 拉伸强度 Rm/MPa | 断口位置 | 横断面背弯 (D=4a, $\alpha=180^\circ$) |
|-----|----------------|------|-----------------------------------|
| 标准值 | ≥ 660 | - | 弯曲无裂纹 |
| 一例 | 777 | 断于焊缝 | 弯曲无裂纹、开口缺陷 |

(4) 弯曲性能。焊缝熔敷金属弯曲试验及板拉伸试验结果见表 6, 面背弯曲试验后的样品形貌见图 3。板拉伸强度满足要求, 面背弯曲无开口、裂纹等缺陷, 弯曲试验合格。

(5) 冲击断口形貌。冲击断口形貌纤维区和剪切唇区都较宽, 几乎没有放射区, 该样品具有高的冲击吸收能, 见图 4 (a)。纤维区 (图 4 (b)) 和剪切唇区 (图 4 (c)) 都是典型的韧窝形貌, 韧窝较深, 分布均匀, 表明熔敷金属具有高的低温冲击韧性。

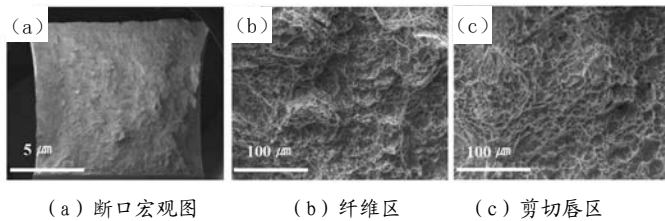


图 4 冲击断口形貌

(6) 焊接接头抗裂性。接头抗裂性试验后样品形貌见图 5。通过对接接头刚性拘束焊接裂纹试验对比, CHW-SMn/CHF610 抗裂性相当, 无裂纹缺陷产生。

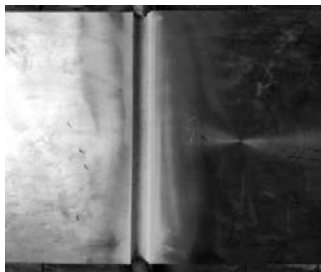


图 5 接头抗裂性试验

(7) 熔敷金属显微组织。由图 6 可知, CHW-SMn/CHF610 埋弧焊焊缝显微组织为奥氏体 + 少量晶界析出物, 无凝固裂纹及再热裂纹。

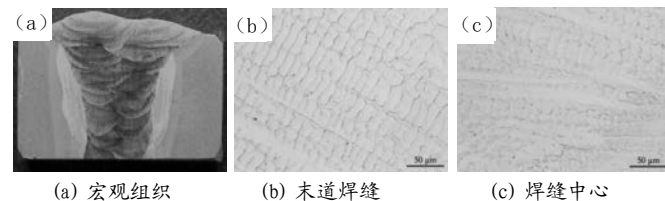


图 6 焊缝组织

(8) 熔敷金属析出物。熔敷金属析出物 EDS 分析结果见表 7。析出物为合金碳化物。在熔敷金属中, 合理的碳元素含量, 加上一定量的铁、铬、钼、钨等元素, 实现了熔敷金属良好的低温韧性。少量的晶界碳化物可使熔敷金属具有良好的抗热裂纹性能。

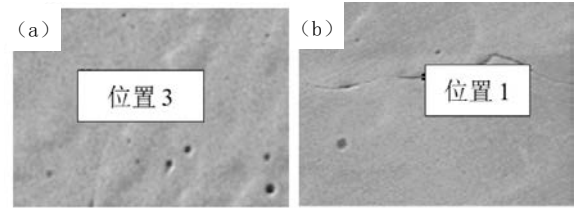


图 7 EDS 分析取样位置

表 7 碳化物析出物成分 (质量分数/%)

| 元素 | C | Si | K | Cr | Mn | Fe | Ni | Mo | Cu |
|------|-----|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| 位置 3 | 8.9 | 1.03 | 0.42 | 3.26 | 20.44 | 54.87 | 5.57 | 4.61 | 0.76 |
| 位置 1 | 7.5 | 0.96 | 0.47 | 3.44 | 24.15 | 52.43 | 6.33 | 4.73 | 0.68 |

5. 结论

(1) CHW-SMn/CHF610 焊丝焊剂具有良好的焊接工艺性。焊接过程稳定、焊缝脱渣性优良、合金元素烧损少、杂质元素渗入少。

(2) CHW-SMn/CHF610 焊丝焊剂熔敷金属屈服强度为 465 MPa、抗拉强度为 739 MPa、延伸率为 40.5%; 焊缝金属 -196°C 冲击功 KV_2 均值为 103 J。

(3) 基于 $\text{CaF}_2\text{-MgO-CaO-Al}_2\text{O}_3$ 氟碱型 CHF610 焊剂能够有效降低熔敷金属裂纹敏感性。

【参考文献】

- [1] 郭伟, 蔡艳, 华学明. LNG 用低温高锰钢及其焊接技术发展 [J]. 电焊机, 2020, 50(11): 7-11+142.
- [2] MAHIN K W, MORRIS J W, WALANABE I. A review of the development of ferritic consumables for the welding of 9%-Nickel steel: research in the U.S and Japan [J]. Advances in Cryogenic Engineering Materials, 2013, 4980: 187-199.
- [3] 薛侃时, 孙大涌, 王滨, 等. 提高高锰奥氏体超低温钢低温韧性的方法 [J]. 机械工程学报, 1998 (06): 12-11+23.
- [4] 孙大涌, 薛侃时, 徐佐仁, 等. 锰低温钢中锰及合金元素的不平衡偏聚 [J]. 机械工程学报, 1998 (04): 2-7+15.
- [5] 付瑞东, 李亮玉, 郑场曾. 高锰奥氏体超低温钢焊接接头的组织和力学性能 [J]. 焊接学报, 2001 (03): 21-24+98.
- [6] 宋聚海, 范会卿, 薛旭斌. 一种 9Ni 钢埋弧横焊用烧结焊剂的研制 [J]. 焊接, 2018 (11): 60-64+68.
- [7] 何少卿. 不锈钢烧结焊剂的研制 [J]. 机械制造文摘 (焊接分册), 2012 (05): 25-29.
- [8] 张其枢, 堵耀庭. 不锈钢焊接 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 38-39.
- [9] 夏毅冰, 董海青, 卢兰志, 等. -196°C 超低温专用不锈钢埋弧焊剂 JWF601CF 的研制 [J]. 现代焊接, 2016 (09): 30-33.

【基金项目】

工业和信息化部“超超临界火电机材料生产应用示范平台建设” (项目编号: TC210H022)

【作者简介】

杨飞 (1977-), 男, 汉族, 四川平昌人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 焊接材料。

【通信作者】

张毅 (1984-), 女, 汉族, 贵州瓮安人, 本科, 工程师, 研究方向: 焊接材料。