

LDX2404双相不锈钢FCAW焊接工艺研究



扫码了解更多

■ 丁云朝, 于宁, 张伟栋

摘要: 通过对FCAW焊接双相不锈钢LDX2404的焊接材料、接头形式和相关焊接参数的初步确定, 重点研究了焊接接头的力学性能和腐蚀性能。结果表明, 本文研究条件下的LDX2404双相不锈钢FCAW焊接参数选择合理, 其焊缝金属可以得到较为理想的铁素体/奥氏体相比例, 焊接接头具有良好的力学性能和耐腐蚀性能。

关键词: FCAW; LDX2404; 接头性能; 微观组织; 耐腐蚀性能

1. 概述

LDX2404于2010年由瑞典奥托昆普钢铁公司开发, 并于2011年获得美国材料试验协会认可, 是一种新型的经济型双相不锈钢。与2205等双相不锈钢及其他超级双相不锈钢相比, LDX2404具有较低的Ni、Mo含量, 较高的Cr、N含量, 在保证其焊接性和耐腐蚀性的基础上, 具有更加突出的经济性, 从而使LDX2404具有更广阔的工业应用空间。

药芯焊丝电弧焊(FCAW)具有焊接工艺性能好, 熔敷速度快、生产效率高, 合金系统调整方便等综合优势。但我国药芯焊丝电弧焊的发展及应用相对滞后, 尤其在合金钢的应用方面。为了推动药芯焊丝电弧焊在双相不锈钢方面应用的发展, 在结合纳米比亚湖山铀矿项目水冶罐区FCAW在LDX2404罐体主焊缝良好应用的基础上, 我们对FCAW

焊接双相不锈钢LDX2404焊接接头的性能进行了进一步的研究, 希望借此为后续工业应用提供参考。

2. 焊接参数的选择及试板的制备

(1) 焊材的选择 LDX2404主要化学成分如表1所示。根据合金元素对组织性能影响分析并结合市场供应情况, 我们初步选定了METRODE的SUPERCORE

2507P(AWS A5.22 E2594T1—4)药芯焊丝进行工艺研究。Supercore 2507P的主要化学成分如表2所示; 药芯焊丝Supercore 2507P与母材LDX2404力学性能比较如表3所示。

(2) 试件规格 试板尺寸350mm×150mm×10mm, V形坡口, 平焊位置, 无衬垫全熔透对接焊, 背面清根后打底焊。坡口设计如图1所示。

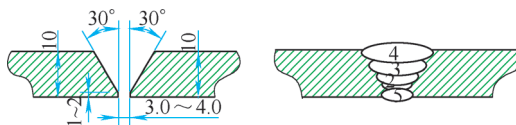


图1 坡口设计

表1 LDX2404主要化学成分(质量分数) (%)

| C | Mn | Si | Ni | Cr | Mo | Cu | N |
|--------|---------|-------|---------|-----------|---------|-----------|-----------|
| ≤0.030 | 2.5~4.0 | ≤0.70 | 3.0~4.5 | 23.0~25.0 | 1.0~2.0 | 0.10~0.80 | 0.20~0.30 |

表2 Supercore 2507P的主要化学成分(质量分数) (%)

| C | Mn | Si | Ni | Cr | Mo | Cu | N |
|-------|-----|------|------|------|-----|-------|------|
| — | 0.5 | — | 8.5 | 24.0 | 3.5 | — | 0.20 |
| ≤0.04 | 2.0 | ≤1.0 | 10.5 | 26.0 | 4.5 | ≤0.50 | 0.30 |

(3) 其他参数选择 保护气体：参考厂家推荐混合气体配比，采用82%Ar+18%CO₂混合气体。金属过渡模式：喷射过渡。层间温度为150℃。热输入为≤1.5kJ/mm。根据焊材生产厂家推荐参数，并结合板厚等经验，确定焊接参数如表4所示。

3. 焊接接头的性能研究

(1) 宏观金相及微观组织分析 试板按照API 650进行目视检查和射线检测，焊缝成形美观，焊缝金属与母材全熔透和全熔合，表面无可见的裂纹、气孔、夹渣、咬边等超标缺陷，并经射线检测合格。说明FCAW对双相不锈钢是适合的。

按照ASTM E340—2015标准对焊缝截面进行宏观金相检测，在10倍放大情况下观察，可以看出焊缝熔合情况良好，未见缺陷（见图2）。

双相不锈钢的焊缝金属属于铸态组织，其凝固模式属于F模式，即在高温固态是稳定的全铁素体组织，当温度低于铁素体固熔线时，奥氏体开始沿铁素体晶粒边界形成，并逐步覆盖整个铁素体组织，两相平衡的数量和F/A比值的大小无论对焊缝的抗裂纹能力，或是对焊缝的力学性能和耐腐蚀性能都有重要影响。最适合的相比是铁素体相和奥氏体相约各占一半，但这样的相比比例控制是不容易达到的。一般认为，当FN在40%~65%之间时通常可以保证最佳的综合性能。利用化学浸蚀法对抛光试样进行蚀刻，观察显微组织形貌，浸蚀剂为FeCl₃盐酸水溶液。焊缝在金

相显微镜下的显微组织如图3所示。

根据WRC—1992相组分图，并结合焊缝金属中合金元素成分的测定数据，得到Creq=27.7866，Nieq=14.158。可以看出，铁素体数FN在，45%~50%之间，相比比例较为理想。焊缝金属中相关合金元素成分如表5所示。

(2) 焊接接头力学性能分析 分别按照ASTM E8/E8M、ASTM E21和ASME IX QW161-

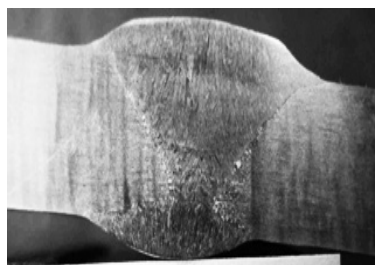


图2 宏观金相

QW162进行常温拉伸、高温拉伸和弯曲试验，试验结果如表6所示。由表6可知，焊缝金属强度高于母材金属，塑性满足要求。

按照ASTM E384-11e1标准，对焊接接头进行维氏硬度检测。硬度点位如图4所示，接头硬度曲线如图5所示。从试验数据来看，焊缝区平均硬度为310HV₁₀，热影响区平均硬度为293HV₁₀，母材平均硬度为285HV₁₀。

(3) 耐腐蚀性能 晶间腐

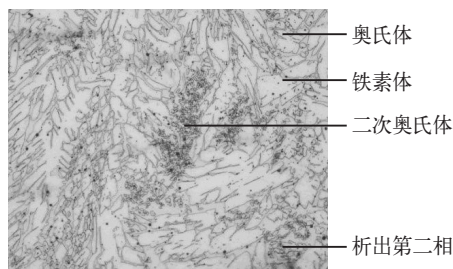


图3 焊缝显微组织

表3 力学性能对比

| 对比项目 | LDX2404 | Supercore 2507P |
|------------------------|---------|-----------------|
| R _m /MPa | ≥680 | ≥760 |
| R _{p0.2} /MPa | ≥480 | ≥550 |

表4 焊接参数

| 焊道 | 焊接方法 | 填充金属规格/mm | 极性 | 焊接电流/A | 电弧电压/V | 焊接速度/cm·min ⁻¹ |
|-------|------|-----------|--------------|---------|--------|---------------------------|
| 打底 | FCAW | φ1.2 | DCEP 直流反接 | 180~220 | 20~24 | 15~20 |
| 填充、盖面 | FCAW | φ1.2 | DCEP 直流反接 | 200~240 | 20~25 | 20~30 |

表5 焊缝金属相关合金元素成分（质量分数）（%）

| C | N | Ni | Cu | Cr | Mo | Nb |
|--------|--------|------|-------|-------|-------|-------|
| 0.0330 | 0.2363 | 8.24 | 0.148 | 24.47 | 3.304 | 0.018 |

表6 拉伸弯曲试验结果

| 试验名称 | 标准 | 试验条件/℃ | 试验结果/MPa |
|------|--------------------------|--------|----------|
| 室温拉伸 | ASTM E8/E8M—2015a | 室温 | 859 |
| 高温拉伸 | ASTM E21—2009 | 150 | 779 |
| 高温拉伸 | ASTM E21—2009 | 250 | 698 |
| 弯曲试验 | ASME IX QW161—QW162 2015 | 室温背弯 | 未见缺陷 |
| 弯曲试验 | ASME IX QW161—QW162 2015 | 室温面弯 | 未见缺陷 |

蚀：按照ISO 3651-2的要求取100mm×40mm×6mm试样两件进行室温环境下晶间腐蚀试验，最终试样未见晶间腐蚀倾向。说明在本文采用的焊接参数下，焊接接头可获得良好的耐晶间腐蚀性能。

氢致裂纹：我们按照NACE TM0284—2016进行了Anti-HIC试验，对一组试样在室温常压环境下，采用A溶液进行96h的试验，试验结束后，未发现氢鼓泡。按照标准分切试样，抛光后用金相显微镜观察表面，得到的裂纹长度率CLR%=0，裂纹厚度率CTR%=0，裂纹敏感率CSR%=0。可以说明在本文焊接工艺条件下，焊接接头具有优良的抗氢致裂纹性能。Anti-HIC试样检测面情况如图6所示。

应力腐蚀：按照NACE TM0177—2016，对焊接接头取1组试样进行室温常压下的Anti-SCC试验，溶液为模拟海水，在

试验装置内720h后，采用四点弯曲法，加载力取90%材料屈服强度，使用10倍放大镜观察试样受拉面，未发现裂纹。表明根据本文选定的焊接工艺条件，在富含氯离子环境下，焊接接头具有良好的抗应力腐蚀能力。

孔蚀：在氯化物环境中耐孔蚀性能可用PREN指数来预测。根据表4焊缝金属相关合金元素成分，PREN≈39%。超级双相不锈钢SAF2507的孔蚀指数一般为42%左右，SAF2304的孔蚀指数一般为25%左右，316L的孔蚀指数一般为24%左右，对于经济型双相不锈钢，焊接接头孔蚀指数达到39%，可以说具有良好的耐孔蚀能力。

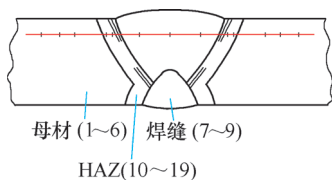


图4 硬度点位

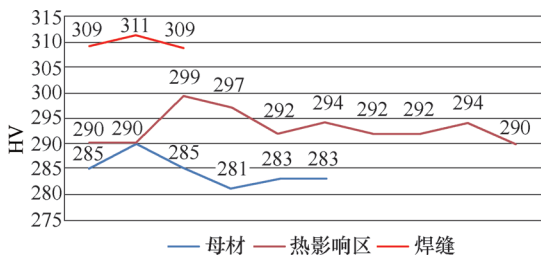


图5 硬度曲线



图6 Anti-HIC试样检测面

4. 结语

根据以上分析，可以看出通

过合理的选择焊接材料、控制热输入等焊接参数，FCAW焊接双

相不锈钢LDX2404能够得到具有良好的抗拉强度和塑性，较为理想的铁素体/奥氏体相比例，以及优良的耐腐蚀性能的焊接接头。本文研究条件下确定的焊接参数以及焊接接头具备的力学性能及腐蚀性能指标对后续FCAW在LDX2404双相不锈钢焊接方面的应用具有一定的指导意义和参考价值。

参考文献：

- [1] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册 焊接方法及设备[M]. 北京：机械工业出版社，2007，258.
- [2] 李晓清，田洪波，王雪骄. FCAW在16MnR (HIC) 抗氢钢压力容器中的应用[J]. 制造与安装，2006，23 (6)：36-38.
- [3] 陈剑虹，译. 不锈钢焊接冶金学及焊接性[M]. 北京：机械工业出版社，2008.
- [4] 吴玖，等. 双相不锈钢[M]. 北京：冶金工业出版社，2000，248-252.
- [5] 汪守朴，等. 金相分析基础 [M]. 北京：机械工业出版社，1986，17.
- [6] 郭秋实，等. 2205双相不锈钢奥氏体铁素体两相间的电偶作用[J]. 腐蚀与防护，2015，36 (12)：1119-1128.

作者简介：丁云朝、张伟栋，中国核工业二三建设有限公司国际事业部；于宁，中广核工程有限公司施工管理中心。

MW 20180114