

热输入对双相不锈钢管接头力学和腐蚀性能的影响

金晓军¹, 霍立兴¹, 张玉凤¹, 白秉仁², 李晓崴², 曹军²

(1. 天津大学, 天津 300072; 2. 中国海洋石油工程有限公司, 天津 300452)

摘要: 采用两种焊接工艺对双相不锈钢管道进行全位置焊接, 对比研究了不同热输入条件下焊接接头的组织、力学性能和抗腐蚀性能。并用扫描电镜分析了缝隙腐蚀后蚀坑的组织特征。结果表明, 焊接热输入是影响焊接接头相比例的一个重要参数, 焊接采用高热输入时, 尽管会使凝固组织铁素体晶粒长大, 但却会促使较多的奥氏体转变。同时相比例又影响着焊接接头的拉伸、冲击韧度等力学性能。蚀坑扫描电镜结果显示铁素体相优先被腐蚀, 露出管状的奥氏体组织, 这是由于合金元素在两相中的分配比例不同造成的电化学势差, 进而形成局部选择性腐蚀。

关键词: 双相不锈钢; 热输入; 力学性能; 扫描电镜; 焊接接头

中图分类号: TG 455 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2004)03-109-04



金晓军

0 序 言

双相不锈钢具有奥氏体和铁素体混合组织, 奥氏体的存在降低了高铬铁素体的脆性、氢脆和晶粒长大倾向, 提高了可焊性和韧度。而富铬铁素体则又提高了奥氏体的屈服强度、抗晶间腐蚀和应力腐蚀能力^[1]。因其具有良好的综合性能, 广泛用于近海结构、石油和天然气的管道输送。双相不锈钢焊接的最大特点是焊接热循环对焊接接头组织的影响^[2], 进而对力学性能和耐腐蚀性能有很大的影响。因此, 双相不锈钢焊接的核心问题是: 一是要使热影响区和焊缝保持合适的相比例, 二是要防止重复加热、冷却过程中由 σ 相引起的脆化。

文中分别通过钨极惰性气体保护焊(GTAW)和焊条电弧焊(MMA)来焊接 SAF2205 双相不锈钢管道, 比较不同的焊接工艺和热输入对焊接接头组织、力学性能和耐腐蚀性能的影响。

1 焊接材料与工艺

1.1 焊接材料

管材、焊丝和焊条均采用瑞典 SANDVIK 生产的焊接材料, 其管道规格为 $\phi 168.28 \text{ mm} \times 7.11 \text{ mm}$, 如图 1 所示。焊材选用手工钨极氩弧焊丝 22.8.3.L, 其规格为 $\phi 2.0 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 。手工电弧焊条 22.9.3.LR, 规格为 $\phi 2.5 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。管材和焊材的化学成分如表 1 所示。

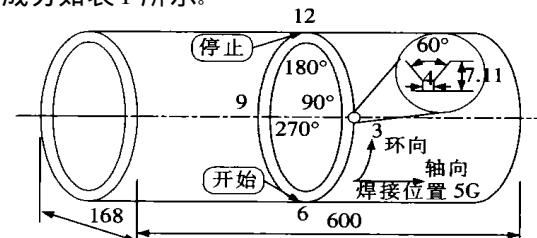


图 1 管道的形状与尺寸

Fig. 1 Shape and size of pipe

表 1 管材和焊材的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of pipe and welding material

管材和焊接材料	Cr	Ni	Mo	N	C	Si	Mn	P	S
SAF2205	22	5	3.2	0.14	0.030	1.0	2.0	—	—
22.9.3.LR	22.5	9	3.0	0.12	0.030	0.8	0.8	0.030	0.025
22.8.3.L	22.5	8	3.0	0.14	0.020	0.5	1.6	0.020	0.015

无论 GTAW 还是 MMA 都要求全位置焊接, 即

收稿日期: 2003-01-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375109)

5G 规范要求: 管道轴线与水平面平行, 在焊接过程中不转动管子。因此焊接顺序先正半周和后负半周完成一道焊缝的工序。在进行钨极惰性气体保护焊

打底焊时, 在定位焊时就应开始使用背面保护气体。其背面保护气体为纯氮气。为防止焊缝表面区域因扩散而损失氮, 通常采用 $\text{Ar} + 2\% \text{N}_2$ 作为电弧保护气体。为保证打底焊时填充金属充分熔敷, 采用 60° 的 V 形坡口, 钝边 $b=1 \text{ mm}$, 间隙 $c=3 \text{ mm}$ 。

1.2 焊接工艺参数

表 2 焊接工艺参数
Table 2 Welding process parameter

焊接方法	焊道	焊材	电压 U/V	电流 I/A	焊速 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	热输入 $E/(\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1})$
GTAW	1	焊丝	11	93	0.47	2.17
	2	焊丝	11	113	0.9	1.38
	3	焊丝	11	113	0.79	1.56
MMA	1	焊丝	11	104	0.78	1.47
	2	焊条	24	61	0.9	1.07
	3	焊条	28	58	1.4	1.17

2 试验方法

2.1 金相组织观察

采用碱性赤血盐溶液浸蚀焊接接头金相试样, 利用 OLYMPUS-GX51 金相显微镜观察了两种焊接工艺下的 SAF2205 管道焊接接头的焊缝, 热影响区和母材的显微组织, 并参照 ASTM E562 标准结点法对焊缝和热影响区试样进行铁素体 α 相数量测定。

2.2 接头硬度测试

采用 HVA-10A 型维氏硬度计测量了两组焊接接头焊缝、热影响区和母材三个区域的维氏硬度, 载荷为 10 kg。其中焊缝测点间距为 1 mm, 热影响区处测点间距为 0.5 mm, 而母材处为 2 mm。

2.3 力学性能试验

根据 ASME IX 的标准要求对两组试样在 3 000 kN 万能试验机上进行了拉伸试验和弯曲试验。还对两组试样焊接接头的焊缝、热影响区和母材进行了在 -90°C 低温冲击试验。试验根据 ASTM A370 标准的要求进行。采用 V 型缺口冲击试样, 试样尺寸为 $55 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。试验在 294/147J 冲击试验机上进行。

2.4 缝隙腐蚀试验

依据 ASTM G48B 标准, 用两个 O 形低硫橡胶圈把 $\phi 15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的聚四氟乙烯圆柱固定在试样上, 将两组试样浸蚀在 $10\% \text{ FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶液中 72 h, 试验温度为 50°C 。用万分之一天平来测量腐蚀前后的失重, 结果精确到 0.001 g。对腐蚀坑进行扫描电镜观察。

GTAW 焊接方法为采用钨极惰性气体保护焊焊丝打底, 单面焊双面成形, 再采用焊丝填充盖面。MMA 焊接方法则是采用钨极惰性气体保护焊焊丝打底, 再采用手工电弧焊填充盖面。焊接时控制层间温度不超过 150°C 。

焊接工艺参数如表 2 所示。

3 试验结果与分析

3.1 金相观察与分析

图 2~3 中灰色基体为铁素体 δ 白色为奥氏体组织^[3]。焊接过程是一个快速加热与快速冷却的热循环过程。在加热过程中, 当热影响区的温度超过双相钢的固溶处理温度, 在 $1150 \sim 1400^\circ\text{C}$ 的高温状态下, 晶粒将会发生长大, 而且发生 $\gamma \rightarrow \delta$ 相变, γ 相明显减少, δ 相增多。高温近缝区出现晶粒较粗大的铁素体组织。如果焊后的冷却速度较快, 将抑制 $\delta \rightarrow \gamma$ 的二次相变, 使热影响区的相比例失调。当铁素体量大于 70% 时, 二次转变的奥氏体也变为针状, 具有魏氏组织特征, 如图 3b 所示。与焊后冷却速度密切相关是焊接热输入^[4], 由于 GTAW 的焊接热输入大于 MMA, 降低了冷却速度, 使得铁素体量比 MMA 中的要多一些(见表 3)。因此, 为了防止热影响区的快速冷却, 使 $\delta \rightarrow \gamma$ 二次相变比较充分, 保证较合理的相比例, 足够的焊接热输入是必要的。

为了降低焊缝金属中的铁素体量, 往往要求在填充金属中的含 Ni 量达到 9%, 但在多道焊时, 来自母材的稀释较小, 造成铁素体量较低, 如图 2a 所示。而少量的铁素体中又会集中较多的铬和钼, 增加了金属间相的析出倾向^[2]。但金相试样中未发现有害金相的存在。在热影响区的冷却段, 高温区的铁素体相向奥氏体相的转变是不平衡的, 奥氏体相大幅度减少, 但仍能有 15% ~ 30% 奥氏体相的析

出,没有纯铁素体晶界。

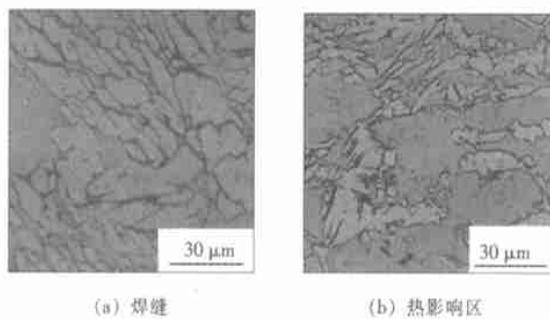


图2 GTAW的焊接接头的显微组织

Fig. 2 Microstructure of GTAW joints

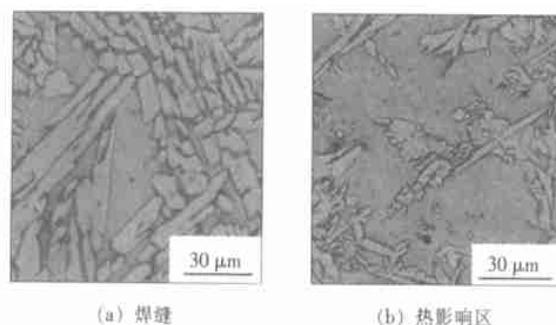


图3 MMA的焊接接头的显微组织

Fig. 3 Microstructure of MMA joints

表3 SAF2205焊接接头中铁素体的百分含量

Table 3 Ferrite volume fraction in the joints

焊接方法	母材	焊缝	热影响区
GTAW	50	32	67
MMA	50	43	79

3.2 硬度试验结果与分析

从图4的硬度分布来看,焊接接头中热影响区的硬度大于母材和焊缝的硬度。这是因为铁素体的

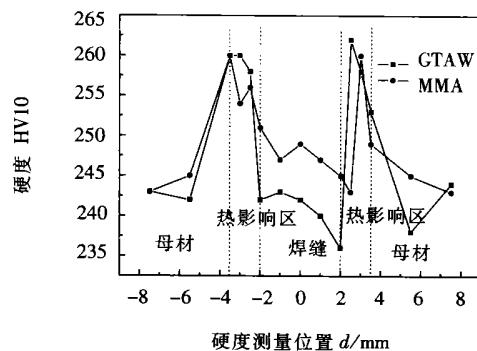


图4 硬度试验结果

Fig. 4 Results of hardness testing

显微硬度大于奥氏体的显微硬度,因此,热影响区中含有较多的铁素体,硬度也随之升高,但并未对焊缝的脆化造成严重的影响,这从图6的冲击韧度试验结果可以看出。

3.3 力学试验结果与分析

两种不同焊接工艺的焊接接头的拉伸试样形状与尺寸如图5所示。试验结果见表4。

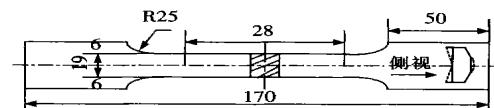


图5 拉伸试样形状与尺寸

Fig. 5 Shape and size of tensile specimen

表4 拉伸试验结果

Table 4 Results of tensile test

焊接方法	拉伸强度 σ_b/MPa	断面收缩率 $\psi(\%)$	伸长率 $\delta(\%)$	断裂位置
MMA	771	59%	25%	母材
GTAW	779	61%	33%	母材

从拉伸试验结果中可以看出,断裂位置都发生在母材部位,说明焊接接头的抗拉强度优于母材。焊接接头的弯曲试验分为面弯和背面,弯曲角为180°,弯曲结果显示,被弯曲表面未发现有裂纹。在低温下的冲击试验结果如图6所示,GTAW和MMA的焊缝和热影响区的冲击功都小于母材,GTAW焊缝的冲击功大于MMA焊缝。这是因为相比例对双相不锈钢的力学性能有较大的影响,随钢中奥氏体数量的增加,屈服强度明显下降,而伸长率和冲击功值明显增加。

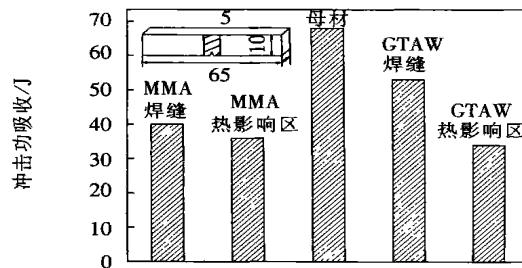


图6 夏比冲击试验结果

Fig. 6 Results of impact test

3.4 缝隙腐蚀试验结果与分析

试验结果得出GTAW和MMA试样的腐蚀速率

分别为 $9.6 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $11.3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。图 7 为 MMA 试样缝隙腐蚀后宏观扫描电镜图, A 点位置的电镜图如图 8 所示。从图中可以看出, 晶粒被腐蚀, 晶界区形成了凹槽, 类似于显微准解理。在含氯化物的溶液中, 首先在奥氏体/铁素体相界遭到侵蚀, 随后铁素体相优先被腐蚀^[5]。图 9 是 GTAW 缝隙腐蚀坑宏观电镜图。如图 10 所示, 铁素体被腐蚀, 剩下管状奥氏体, 其截面为蚁穴形。这是由于合金

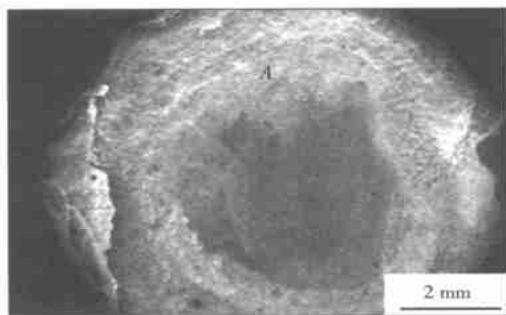


图 7 MMA 缝隙腐蚀坑宏观电镜图

Fig. 7 SEM morphology of crevice corrosion pit of MMA joint

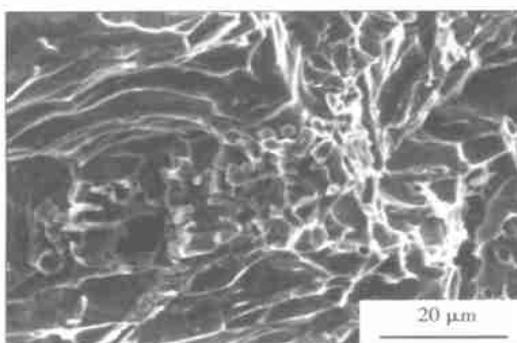


图 8 A 点处的扫描电镜图

Fig. 8 SEM morphology of A position

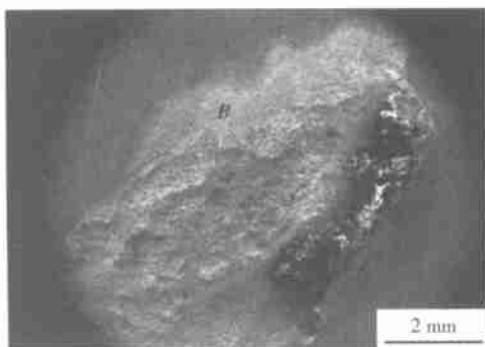


图 9 GTAW 缝隙腐蚀坑宏观电镜图

Fig. 9 SEM morphology of crevice corrosion pit of GTAW joint

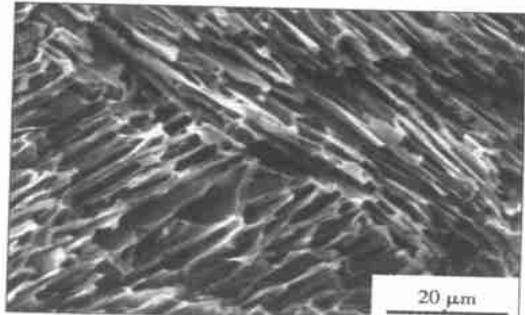


图 10 B 点处的扫描电镜图

Fig. 10 SEM morphology of B position

元素在两相中的分配比例不同造成的电化学势差, 进而形成局部选择性腐蚀。

4 结 论

(1) 焊接工艺中的热输入和多层焊(可使焊接 HAZ 二次受热)对焊接 HAZ 组织影响较大。两相比例对焊接接头的力学性能和耐腐蚀性能都有重要的影响。

(2) 比较 GTAW 和 MMA 两种不同的焊接工艺下焊接接头的组织、力学性能和耐缝隙腐蚀性能, GTAW 工艺下的焊接接头的各项性能指标优于 MMA。

(3) 缝隙腐蚀的蚀坑的 SEM 显示铁素体相优先被腐蚀, 露出管状的奥氏体组织, 这是由于合金元素在两相中的分配比例不同造成的电化学势差, 进而形成局部选择性腐蚀。

参考文献:

- [1] 张京海. 双相不锈钢焊接技术状况[J]. 材料开发与应用, 1995, 10(5): 25~26.
- [2] Liljas M. Microstructure in explosioly welded duplex stainless steel [A]. Duplex Stainless Steels[C], 4th Int. Conf. 1994.
- [3] Homg Yih Liou. Microstructure and pitting corrosion in simulated heat-affected zones of duplex stainless steel[J]. Materials Chemistry and Physics, 2002, 74(1): 33~42.
- [4] Kordatos J. D. The effect of cooling rate on the mechanical and corrosion properties of SAF2205(UNS 31803) duplex stainless steel welds [J]. Scripta Materialia, 2001, 44(3): 401~408.
- [5] Schmidt Rieder E. In situ electrochemical scanning probe microscopy corrosion studies on duplex stainless steel in aqueous NaCl solutions [J]. Brit. Corros. J. 1996, (31): 139~145.

作者简介: 金晓军, 男, 1978 年出生, 博士研究生。主要研究方向: 材料强度与断裂研究, 发表论文 10 篇。

Email: jinxiaojun2005@hotmail.com