

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, 李晓崑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易长大, 但却会促使较多的奥氏体转变。同时相比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 $\phi 2.0 \text{ mm} \times 1\,000 \text{ mm}$ 。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。

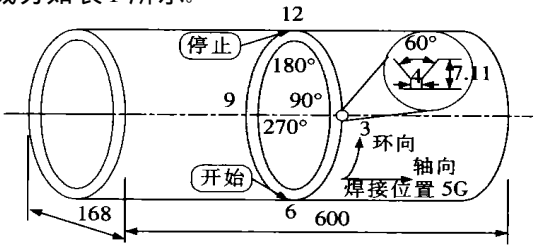


图 1 管道的形状与尺寸
Fig. 1 Shape and size of pipe

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	—	—
22.9.3LR	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

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 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 。

焊接工艺参数如表 2 所示。

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 $3\text{ }000\text{ kN}$ 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 $-90\text{ }^\circ\text{C}$ 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 $294/147\text{ J}$ 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 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 。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。

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 $1\text{ }150\sim 1\text{ }400\text{ }^\circ\text{C}$ 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,使热影响区的相比比例失调。当铁素体大于 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,使得铁素体转变成奥氏体较充分,所以 GTAW 接头中的奥氏体量比 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含量,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^[4]。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 $15\%\sim 30\%$ 奥氏体相的析

出, 没有纯铁素体晶界。

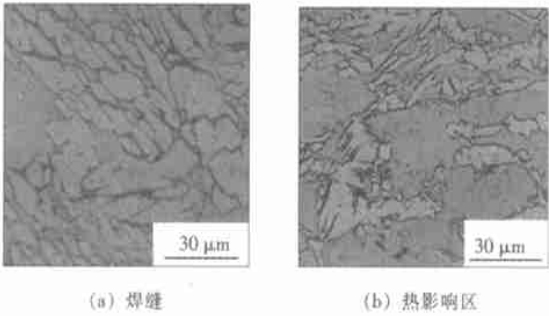


图 2 GTAW 的焊接接头的显微组织
Fig. 2 Microstructure of GTAW joints

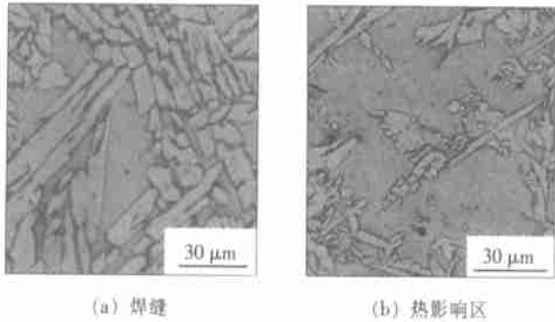


图 3 MMA 的焊接接头的显微组织
Fig. 3 Microstructure of MMA joints

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

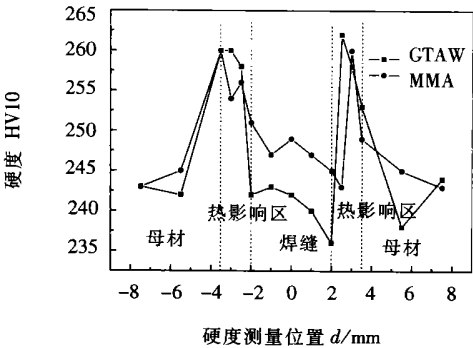


图 4 硬度试验结果
Fig. 4 Results of hardness testing

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。

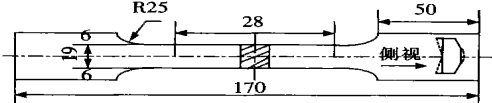


图 5 拉伸试样形状与尺寸
Fig. 5 Shape and size of tensile specimen

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 ψ (%)	伸长率 δ (%)	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。

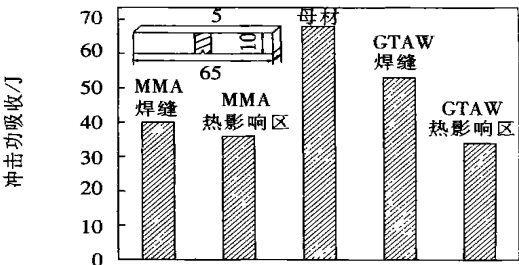


图 6 夏比冲击试验结果
Fig. 6 Results of impact test

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

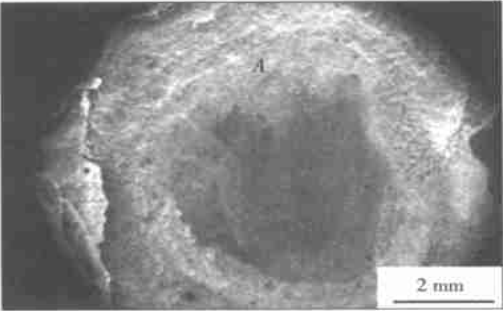


图 7 MMA 缝隙腐蚀坑宏观电镜图
Fig. 7 SEM morphology of crevice corrosion pit of MMA joint

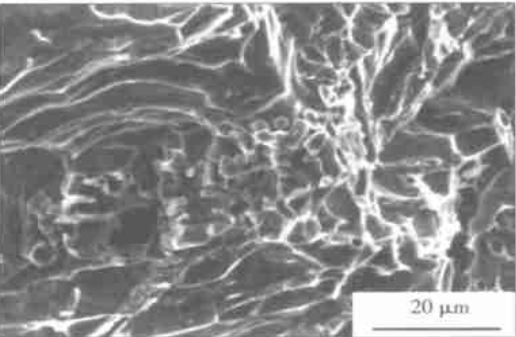


图 8 A 点处的扫描电镜图
Fig. 8 SEM morphology of A position

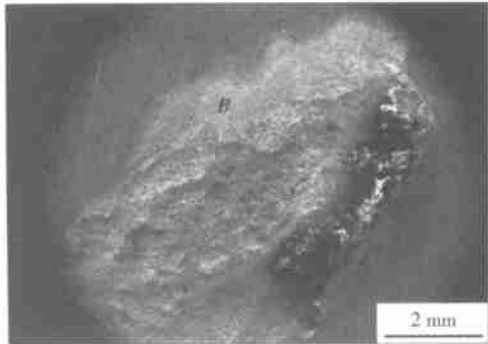


图 9 GTAW 缝隙腐蚀坑宏观电镜图
Fig. 9 SEM morphology of crevice corrosion pit of GTAW joint

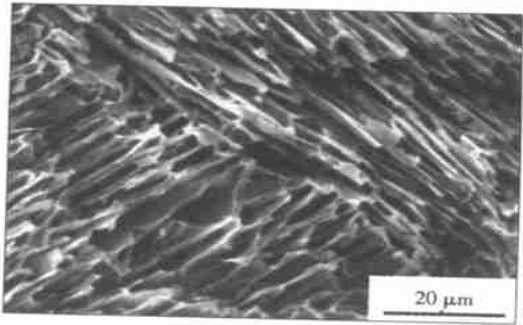


图 10 B 点处的扫描电镜图
Fig. 10 SEM morphology of B position

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 explosively welded duplex stainless steel [A]. Duplex Stainless Steels[C], 4th Int. Conf. 1994.

[3] Hong 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 Material. 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