



超级马氏体不锈钢焊接工艺

王金生

【摘要】 针对12Cr型低碳马氏体不锈钢的特点，开发出了两套焊接工艺。试验结果表明，本次所开发的焊接工艺在不进行焊后热处理的状态下，焊接接头各项性能均能满足使用要求，提高了焊接效率。

关键词： 超级马氏体；不锈钢；焊接工艺

1. 概述

随着海洋油气开采规模的不断扩大，一些油气田介质的腐蚀性对油气输送管道所用材料的性能提出了更高的要求。由于传统的低碳钢管道材料的强度、韧性、耐蚀性已不能满足高标准的要求，所以具有良好性能的低碳马氏体不锈钢无缝管逐渐开始应用于海底管道。

此种新型管道用马氏体不锈钢其主要化学成分为0.01C-12Cr-5Ni-2Mo-0.01N，具有优良的力学性能和耐蚀性，故称超级马氏体不锈钢，是一种高寿命周期低成本的经济型材料。基于这种新材料的技术优点和经济性，中海油在南海某项目上使用此种材料，来应对油气田富含CO₂而带来的腐蚀性。然而在我国，有关

超级马氏体不锈钢的研究基本属于空白状态，所以开发低碳马氏体不锈钢海管的焊接工艺具有重要的工程价值。

2. 超级马氏体不锈钢特点

(1) 超级马氏体不锈钢的化学成分及微观组织 传统的马氏体不锈钢含w_{Cr}通常为13%和17%左右，且含C量较高，缺乏足够的延展性，而且焊接性差。为了克服上述不足，通过降低含碳量（最高碳含量为0.01%），增加镍含量（3.5%~4.5%），开发出了一系列新的合金。这类合金综合力学性能提高，耐腐蚀性良好，形成了新的超级马氏体不锈钢系列，成为不锈钢中耀眼的一个系列，受到人们广泛的关注。超级马氏体不锈钢的化学成分如表1所示。此种钢经过调

质处理，其微观组织主要是低碳回火马氏体，微观金相如图1所示。

(2) 超级马氏体不锈钢的力学性能 超级马氏体不锈钢的力学性能优异（见表2），强度级别为X80级，最小屈服强度可达550MPa，抗拉强度可达700MPa，-40℃下的夏比冲击韧性可达200J。

(3) 超级马氏体不锈钢的抗CO₂应力腐蚀性能 由于此种不锈钢具有超低的碳含量，所以改善了其耐CO₂腐蚀性。在各种温度及介质浓度下的CO₂应力腐

表1 超级马氏体不锈钢的化学成分（质量分数） (%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	N
<0.01	0.16	0.58	12.3	5.5	2.0	0.11	<0.01



图1 超级马氏体不锈钢的微观金相

蚀性能如表3所示。所用标准为ASTM G39的4点弯腐蚀试验。由表3可见,此种超马氏体不锈钢的耐CO₂应力腐蚀性能优异。

(4) 热处理对各项性能的影响 与传统马氏体不锈钢类似,超级马氏体的焊接接头受焊接参数影响较大,通常都需要进行焊后热处理。焊后热处理对焊接接头的改善主要包括:降低热影响区硬度,提高焊接接头耐腐蚀性能。

综上所述,超级马氏体不锈钢具有良好的综合性能,高强度、高低温韧性、耐各种环境的腐蚀,是优等的不锈钢种类。但在焊接时,其焊接方法和参数如何选择,其焊接接头部位能与母材性能相匹配是我们主要关注及研究的方向。

3. 焊接工艺的设计

(1) 焊接工艺的开发 结合超级马氏体不锈钢的材质特点和使用环境的要求,我们开发了一套性能匹配性好,免除焊后热处理的有效焊接工艺。设计目标是焊缝强度达到母材相同水平,-10℃韧性达到45J以上,焊接接头硬度在320HV10以下,焊缝具有0℃下0.2mm以上的CTOD值并且耐CO₂应力腐蚀、耐氢脆性能良好。

本次焊接工艺开发所使用的材料是由日本JFE公司生产的最新型号的低碳马氏

体不锈钢无缝管,规格为φ324mm×19mm×300mm,化学成分如表4所示。

开发的焊接工艺包括一套钨极氩弧焊和一套焊条电弧焊焊接工艺,接头形式为V形坡口、环焊缝。所用焊材为瑞典Sandvik公司的双相钢焊材,其熔敷金属主要化学成分为22%Cr、5%Ni、3.2%Mo,焊接参数如表5所示。焊接工艺的要点在于控制热输入不能过高,层间温度要合适,根焊道保护充分,冷却速度不能过高或过低,冷却条件决定焊缝的微观组织。

(2) 试验及数据分析 对焊接接头进行了全面性能试验,包括力学性能、断裂韧性性能、腐蚀性能试验。焊接接头的宏观图片如图2所示。两种焊接方法的焊接接头力学性能数据如表6、表7所示。

-10℃的低温夏比冲击韧性对比如表8所示,由表8可知氩弧焊比手工焊的低温韧性要好。焊缝0℃下的断裂韧性(CTOD)值如表9所示。

因为焊接接头的抗腐蚀及抗氢脆性能对此次焊接工艺的开发极为重要,所以对焊接接头进行了严格的CO₂应力腐蚀及氢脆试验。采用标准为ASTM G39标准四点弯试验,载荷为90%SMYS,在50℃下3.5%的NaCl⁺的溶液,pH值保持在4.5,CO₂分压为10kPa,氢脆试验加-1150mV的电位,验收标准为7天后表面无裂纹。试验结果如表10所示。试验后接头宏观照片如图3所示。试验结果表明,焊缝及热影响区均无裂纹产生,有很好的抗CO₂应力腐蚀性能。

焊接接头的硬度如图4所示,分别在厚度中心线、距上下

表2 超级马氏体不锈钢的力学性能及硬度

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率 (%)	屈服比	硬度HV10
550~700	>700	>20	<0.9	<270

表3 超级马氏体不锈钢的抗CO₂应力腐蚀性能

NaCl浓度 (%)	负荷/MPa	pH值	CO ₂ 分压/kPa	温度/℃	时间/h	结果
5.0	90%Y _s	2.5	10	70	172	无裂纹
5.0	90%Y _s	2.0	10	90	172	无裂纹

表4 JFE超级马氏体不锈钢化学成分

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	N
<0.01	0.16	0.58	12.3	5.5	2.0	0.11	<0.01

表5 焊接参数

焊接方法	焊材型号	焊材牌号/mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /mm·min ⁻¹	热输入 /kJ·mm ⁻¹	预热、层间温度 /℃	焊接设备
GTAW	E2209	Sandvik 22.8.3.L φ2.4	110~170	10~15	60~120	1.5~1.8	50、150	Panasonic TX II 315
SMAW	ER2209	Sandvik 22.9.3.LR φ3.2	85~120	21~25	70~130	1.5~1.8	50、150	Panasonic TX II 315



图2 焊接接头宏观照片
表6 拉伸试验性能

组别	试样编号	断裂载荷/kN	抗拉强度/MPa	断面收缩率 (%)	断裂位置
氩弧焊	A13	378	818	66	母材
	A14	380	818	68	母材
焊条电弧焊	B13	380	814	67	母材
	B14	372	797	69	母材

表7 焊缝金属力学性能

组别	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率 (%)	断面收缩率 (%)
氩弧焊	683	819	27.8	80.6
	674	817	30.4	77.4
焊条电弧焊	665	812	22.3	43.5
	639	802	22.5	34.2

表8 夏比冲击韧性对比

方法	试验部位	冲击吸收能量/J	平均值/J
GTAW	焊缝	292	293
		292	
		294	
	熔合区	272	264
		250	
		269	

表9 焊缝CTOD值

焊接方法	开口位置	试件编号	CTOD值/mm
氩弧焊	焊缝 (0℃)	A1	1.2161
		A2	1.3663
		A3	1.2947
焊条电弧焊	焊缝 (0℃)	B1	0.3168
		B2	0.3172
		B3	0.1852

表10 CO₂应力腐蚀试样参数

试件编号	试件厚度/mm	试件平均厚度/mm	屈服强度90% /MPa	弯曲挠度/mm
GTAW-96	3.02	3.08	610	4.52
	3.09			
	3.14			
SWAW-97	3.14	3.08	587	4.35
	3.05			
	3.06			



图3 试验后接头宏观照片

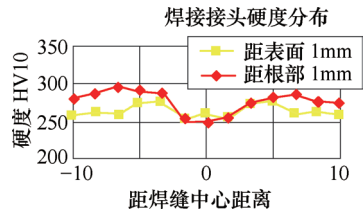


图4 焊接接头硬度分布

表面1.5mm处测其母材、热影响区、焊缝的维氏硬度。与厂商提供的热处理后的硬度相比，本次开发的焊接工艺硬度可以达到免除进行焊后热处理的要求。

4. 结语

由以上结果可以看出，我们开发的低碳马氏体不锈钢的两种焊接工艺均获成功，焊接接头无论是力学性能还是腐蚀性能均能达到较高的水平，并且免除了焊后热处理。另外，本次开发的两种焊接工艺均可以达到我们开发的预期目标，在焊接接头硬度、韧性、CTOD值上均能达到针对使用环境而制定的目标。氩弧焊使用氩气保护，电弧稳定，热输入控制较为精准，得到的接头性能优良；而焊条电弧焊效率高，环境适应性强，所以两种焊接工艺均可以在超级马氏体不锈钢的焊接中应用，并可得到较好的接头性能。

作者简介：王金生，海洋石油工程股份有限公司。