

极寒地区S355ML钢埋弧焊焊接工艺开发

孙灵军, 孙玉敬, 孙洪亮, 牛天军, 王兴远, 靳伟亮

海洋石油工程(青岛)有限公司 山东青岛 266520

摘要: 极寒地区采用的S355ML钢具有强度高、低温韧性好的特点, 通过合理选取焊接材料, 并对预热温度、最大层间温度及热输入的控制, 开发了符合极寒地区S355ML钢的 -50°C 低温韧性要求的埋弧焊焊接工艺。埋弧焊焊接工艺评定试验结果表明: 接头的强度满足要求, 塑性良好, 低温韧性远超项目合格值, 工艺开发取得成功。

关键词: S355ML; 埋弧焊; 工艺开发

Development of submerged arc welding process for S355ML steel used in extremely cold regions

SUN Lingjun, SUN Yujing, SUN Hongliang, NIU Tianjun, WANG Xingyuan, JIN Weiliang

Offshore Oil Engineering (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao 266520, Shandong, China

Abstract: The S355ML steel used in extremely cold areas has the characteristics of high strength and strict requirements for low-temperature toughness. By reasonably selecting welding materials and controlling the preheating temperature, maximum interlayer temperature and heat input, a submerged arc welding process of S355ML steel is developed for extremely cold areas with low temperature toughness of -50°C . The results of the welding process qualification test of submerged arc welding show that the strength of the joint meets the requirements, the plasticity is good, and the low-temperature toughness far exceeds the qualified value of the project. The process development is successful.

Keywords: S355ML; submerged arc welding process; process development

1 序言

热机械轧制工艺(TMCP)钢材是通过加入微合金元素并配以控轧控冷工艺获得细小晶粒和良好的组织, 来提高钢材的强韧性, 进而改善钢材的焊接性。与传统钢材相比, 除了强韧性与焊接性外, 其在成本、碳排放和环境保护等方面也均表现出显著的优势, 因此在能源、船舶、电力等工业领域得到广泛应用。

S355ML钢属于TMCP钢的一种, 它是欧洲标准

EN 10025-4: 2019《热机械轧制可焊接细晶粒结构钢》中一种低合金高强度钢, 具有优良的焊接性和力学性能。S355ML钢的高强度和良好的韧性使其在工程结构中具有重要的地位, 尤其是在 -50°C 下的良好韧性, 确保其在寒冷环境下也可以使用。

国内某LNG项目中, 模块结构单体最终将在气温达 -50°C 的北极圈常年冻土带进行服役, 因此主结构钢材选择了S355ML钢。由于模块结构中存在大量的立柱管、拉筋管和组合梁需要进行预制焊

接,而这些均需要采用埋弧焊工艺进行施焊,因此需要开发针对该材料的埋弧焊工艺。

本文通过开展焊接试验,完成了S355ML钢埋弧焊工艺的开发,用以指导卷管、组合梁预制的焊接施工。

2 母材焊接性分析

S355ML钢为执行标准EN10025-4:2019的TMCP可焊接细晶粒结构钢,其中,M代指TMCP,L代指冲击性能试验温度不低于 -50°C 。该材料主要是通过将控制轧制和控制冷却技术结合起来,在降低碳含量和合金元素含量的同时,达到所需要的强度与韧性,因此其在降低碳当量、节能、节省合金元素、焊接性及低成本等方面与普通工艺相比拥有无可比拟的优越性。

本项目中该材料的最大碳当量为0.39%,一般来说,当碳当量不超过0.40%时,认为焊接性优秀。在EN 10025-4:2019中,TMCP的最大碳当量较正火工艺的最大碳当量降低0.03%。

在以往的TMCP钢焊接中,主要存在的问题是热影响区的脆化。这主要是由热影响区在焊接热循环作用下晶粒长大导致的。目前,主要通过钢材生产过程中加入Ti,通过形成TiN、TiO等化合物来抑制晶粒长大,确保焊接接头在较高热输入下也可以保持高的焊接韧性。此外,通过优化焊接参数,减少高温停留时间,采用合适的 $t_{8/5}$,也可以避免热影响区的脆化。

对于S355ML钢,焊接时尤其要注意控制合理的热输入,因为过大的热输入会导致粗晶区晶粒严重长大或出现魏氏组织,从而导致韧性降低。但在热输入过小时,也会导致因粗晶区马氏体比例增大

而降低韧性。此外,还要特别注意最大层间温度的控制,过高的层间温度会导致焊接接头的强度和韧性降低,因此一般最大层间温度不超过 250°C 。

3 焊接工艺开发

(1) 母材 试验母材选用S355ML钢,厚度为25mm,试验母材的碳当量为0.39%。其化学成分见表1,力学性能见表2。

(2) 焊接方法 根据施工需求,选用焊条电弧焊打底,埋弧焊填充、盖面的工艺。

(3) 焊接材料 对于S355ML钢的焊接,焊接材料的选择至关重要。应选用具有良好低温韧性与强度匹配的焊接材料^[1-3]。焊条电弧焊使用AWS A5.5 E7016-G焊条,该焊条的选用既考虑了低温韧性与强度的匹配,也考虑了接头单面焊双面成形的需求。该焊接材料适合于全位置焊接,且具有在低焊接电流下优良的电弧稳定性。该焊接材料使用前需要经 $350\sim 400^{\circ}\text{C}$ 烘干1h,且在 150°C 进行保温。施工现场使用时,需将焊条放置于 75°C 的焊条桶内进行发放。

埋弧焊焊接材料选用AWS A5.23 F8A8ENi1K-Ni1,该焊接材料为低碳中锰高硅镍合金埋弧焊焊丝,焊缝外观平滑,具有优良的脱渣性。焊剂的粒度为 $10\sim 60$ 目,合适的焊剂粒度有利于改善焊接过程中熔渣的排出与气体的逸出。

焊接材料中均严格控制了碳含量,并且添加适量的Si、Mn元素,以保证强韧性。此外,加入大量的Ni元素来提升低温韧性,加入Ti、B等微量元素来细化晶粒,提高强度和韧性。所有焊接材料均需满足扩散氢含量 $\leq 5\text{mL}/100\text{g}$ 的要求。试验焊接材料的熔敷金属化学成分见表3,力学性能见表4。

表1 试验母材化学成分(质量分数) (%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb	V	Ti	Ni
要求值	≤ 0.16	≤ 0.55	≤ 1.70	≤ 0.030	≤ 0.025	≤ 0.35	≤ 0.06	≤ 0.12	≤ 0.06	≤ 0.55
实际值	0.06	0.17	1.54	0.005	0.0015	0.17	0.038	0.006	0.016	0.38

表2 试验母材力学性能

性能指标	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率 (%)	-50°C 冲击吸收能量/J	
要求值	≥ 355	470~630	≥ 22	≥ 19 (单值)	≥ 27 (均值)
实际值	495	557	31	348、351、314	337

表3 试验焊接材料的熔覆金属化学成分（质量分数）（%）

元素		C	Si	Mn	P	S	B	Ti	Ni
AWS A5.5 E7016-G	要求值	≤0.10	0.30~0.90	1.00~1.60	≤0.020	≤0.020	0.0005~0.0045	0.005~0.035	0.30~0.70
	实际值	0.06	0.59	1.20	0.010	0.003	0.0030	0.013	0.49
AWS A5.23 F8A8ENi1K-Ni1	要求值	≤0.12	0.40~0.80	0.80~1.40	≤0.020	≤0.020	—	—	0.75~1.25
	实际值	0.052	0.46	1.06	0.012	0.006	0.0038	0.014	0.87

表4 试验焊接材料力学性能

性能指标		屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率（%）	-60℃冲击吸收能量/J	
AWS A5.5 E7016-G	要求值	≥390	≥490	≥22	≥38	≥50
	实际值	458	561	35	65、73、78	72
AWS A5.23 F8A8ENi1K-Ni1	要求值	≥470	550~700	≥20	≥38	≥50
	实际值	490	560	36	202、178、193	191

（4）焊接试件 焊接试件的选取除了满足焊接评定范围需求外，还需要具备足够的长度与宽度，以满足力学性能试验的取样要求。焊接试件在平焊位置进行，选用单面焊接坡口，具体坡口形式如图1所示。

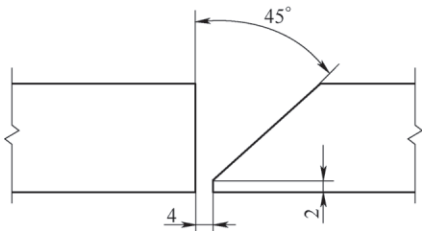


图1 坡口形式

（5）焊接参数 焊接参数的选取以厂家推荐工

艺参数为基础，结合母材的焊接性，在综合考虑焊缝成形、焊接接头性能以及焊接生产效率后进行确定，施焊时尽量选取大电流、高焊接速度对应的合理焊接热输入量进行焊接^[4, 5]。确定的试验用焊接参数见表5。

（6）预热温度与层间温度 合理的预热温度和层间温度对于防止焊接裂纹、保障焊接接头的性能具有重要意义。考虑焊接母材的低碳当量及较小的厚度，基于AWS D1.1：2020《钢结构焊接规范》，选定最小预热温度为20℃。层间温度的选取基于母材厂家推荐与项目规格书要求，限制为250℃。焊接完成后，试件在室温下自然冷却。

表5 试验用焊接参数

焊接位置	焊接方法	焊接材料分类号	焊接材料直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/（cm/min）	热输入/（kJ/mm）
打底	焊条电弧焊	AWS A5.5 E7016-G	3.2	85	21	5	2.1
填充、盖面	埋弧焊	AWS A5.23 F8A8ENi1K-Ni1	4.0	600	31	33	3.3

4 焊接接头性能评估

试件在焊接完成24h后进行无损检测，并在检测合格后开展力学性能试验。

力学性能试验主要包含拉伸试验、弯曲试验、宏观金相检测、硬度检测与冲击试验，试验结果见表6。

表6 焊接试件力学性能试验结果

拉伸试验	弯曲试验	宏观金相	硬度试验HV10					-50℃冲击试验A _{KV} /J			
抗拉强度/MPa	侧弯180°		母材	热影响区	焊缝	热影响区	母材	焊缝	熔合线	熔合线+1mm	熔合线+5mm
551、567	完好	完好	198 197 196	200 207 217	216 212 214	217 201 198	203 194 197	单值186、 218、210 均值：205	单值227、 202、222 均值：217	单值355、 280、288 均值：308	单值382、 339、383 均值：368

(1) 拉伸试验 进行了2个矩形试样的拉伸试验，其抗拉强度分别为 551MPa和 567MPa，2个试样的抗拉强度均大于母材的名义最小抗拉强度490MPa，说明焊接接头的抗拉强度满足要求。

(2) 弯曲试验 进行了4个侧向弯曲试样的试验，弯曲角度为180°，无开裂等缺陷产生，结果均为合格，表明焊接接头的塑性良好。

(3) 宏观金相检测 对焊接接头进行宏观金相检测，焊缝成形良好，无裂纹、气孔等缺陷。

(4) 硬度检测 对试样进行了维氏硬度检测（载荷为10kgf），检测位置包括母材、热影响区和焊缝金属。从试验数据来看，硬度值都远小于325HV10，且硬度分布均匀，硬度值在较小范围内波动，没有出现不同区域硬度值过高或过低的情况。

(5) 冲击试验 在-50℃下进行了夏比V型缺口冲击试验，试样尺寸为 10mm×10mm×55mm。焊接接头包括焊接金属中心线、熔合线处、熔合线+1mm处、熔合线+5mm 处的各个位置的冲击吸收能量单值与均值均远大于项目要求（单值19J、均值27J）。冲击试验结果表明，焊接接头在-50℃下具有优异的韧性。

5 结束语

本文通过分析母材的焊接性，选择匹配的具有-60℃良好韧性的焊接材料AWS A5.5 E7016-G与AWS A5.23 F8A8ENi1K-Ni1，并分别限制其最大热输入为2.1kJ/mm、3.3kJ/mm，控制预热温度20℃，最大层间温度250℃，实现了极寒地区S355ML钢埋弧焊焊接工艺的成功开发，保障了项目的施工顺利开展，也积累了极寒服役条件下结构钢工艺开发经验，为公司承揽同类型项目奠定了基础。

参考文献：

[1] 石南辉，颜世周，张科研，等. 基于欧洲标准的风电塔筒用S355NL钢焊接工艺评定[J]. 焊管，2018，41（9）：21-24.

[2] 吴保桥，邢军，张建，等. 具有良好低温韧性的热轧S355ML H型钢的焊接冷裂纹敏感性[J]. 热处理，2018，33（5）：27-30.

[3] 孔帅，白冰. 海上风电单桩超厚钢板拼板焊接工艺[J]. 焊接技术，2023，52（7）：62-65，130.

[4] 李福东. 小坡口双丝埋弧焊焊接工艺研究[J]. 焊接技术，2023，52（5）：79-83.

[5] 张剑利，宋峥嵘，程晋宜，等. 免清根小坡口角度埋弧焊焊接工艺开发[J]. 焊接技术，2019，48（4）：49-51.

（收稿日期：20250207）

《金属加工（热加工）》2025年第7期广告目次

单位名称	查询编号	位置	单位名称	查询编号	位置
北京金威焊材有限公司	1161	封面	昆山京群焊材科技有限公司	5123	前彩1
易孚迪感应设备（上海）有限公司	1492	封二	南通振康焊接机电有限公司	1362	前彩2
公益广告	8000	封三	公益广告	8000	V
盐城高周波热炼有限公司	5326	封底			