



船用LNG液罐9Ni钢材料 焊接工艺

赵瑞辉

【摘要】 船用LNG液罐9Ni钢材料，淬火加回火状态供货，焊接时会遇到低温韧性、热裂纹、冷裂纹、电弧磁偏吹等问题，制定相应焊接工艺措施，以平、横、立、仰四个位置分别进行焊接工艺评定试验。结果表明，制定的焊接工艺可以保证焊接接头各项性能满足标准规范要求，进一步细化制定施工焊接技术要求，保证现场施工焊接质量。

关键词： 9Ni；焊接工艺；焊接工艺评定；技术要求

我公司为某船配套制造4台船用LNG（液化天然气）液罐（见图1），为C型独立液货舱，卧式单体罐结构由圆筒体和两个球形封头组成，设置有气室及积液槽，气室上配有人孔，罐内有加强环、真空环，制荡舱壁，扶梯、平台和管系，罐外有固定和活动鞍座、止浮装置、层压木等。罐体材料为9Ni钢，封头壁厚11.2mm，筒体壁厚18mm，单罐容积为6500m³，设计温度-163℃，设计蒸汽压力4.56bar（1bar=10⁵Pa），建造标准规范为IGC规则（国际散装运输液化气体船舶构造与设备规则）和LR规范。9Ni钢为我公司首次在产品制造中使用的材料，为保证焊接接头质量，进行一系列焊接工艺评定试验，制定焊接工艺满足施工要求。

1. 焊接性分析

产品所用9Ni钢材料的化

学成分及力学性能如表1、表2所示，供货状态为淬火加回火（QT），为低碳马氏体组织，低温韧性优异，焊接性良好。焊前不需预热，焊后不需进行热处理，焊接时会遇到的问题主要有

焊接接头的低温韧性、热裂纹、冷裂纹及电弧磁偏吹等。

2. 焊接工艺制定

该LNG液罐产品长度约为57.7m，内直径为12 600mm，限于制造场地条件，分四段制作。

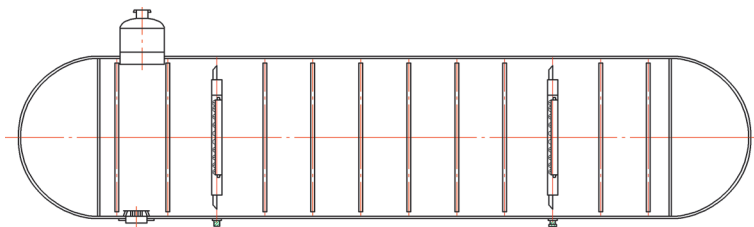


图1 船用LNG液罐结构

表1 化学成分（质量分数）（%）

板厚/mm	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Cr	Mo
11.2	0.04	0.20	0.66	0.005	0.001	9.15	0.01	0.02	0.003
18	0.05	0.22	0.66	0.004	0.001	9.08	0.01	0.02	0.004

表2 力学性能

板厚/mm	屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	伸长率 (%)	冲击吸收能量 (-196℃) / J
11.2	592	719	26.5	125; 120; 106
18	615	702	26.0	213; 229; 184

球形封头为瓜瓣和顶圆板压制成形后在胎架上组装,分段中单个筒节由多块板拼接而成,立式组对,纵缝为立焊位置,筒节间环缝为横焊位置,分段制作完成后在滚轮胎架上卧式组对合拢,合拢缝有平、立、仰三个焊接位置。由此可见该产品制造涉及到全位置焊接,每个位置均需制定相应的焊接参数,并进行焊接工艺评定试验,以保证施工焊接质量。

(1) 焊接方法及材料 产品制造主要采用焊条电弧焊,焊材选用伊萨生产的OK92.55焊条,型号为ENiCrMo—6,为Ni基(w_{Ni} 约60%以上)焊材,经LR船级社认可,熔敷金属化学成分及力学性能如表3、表4所示。

(2) 坡口形式 封头筒体坡口采用机械加工,其他部位(如筒体开孔)可采用等离子切割加工,坡口表面应光洁、平整,无毛刺、裂纹等缺陷。焊接前将坡口及母材两侧30mm范围内采用专用氧化铝砂轮片或不锈钢钢丝刷清理干净,双面焊反面清根后,修理出U形坡口,避免坡口过深、过窄,坡口形式如图2所示。

(3) 温度控制 根据9Ni钢材料的焊接性,焊前不采取预热措施,焊后不进行消除应力热处理,但对于钢板焊前表面湿气的去除,焊前可适当采用火焰烘烤,避免焊缝中产生气孔缺陷。焊接过程中,道间温度控制在 $<150^{\circ}\text{C}$ 。

(4) 焊接参数 根据产品制造条件,按每个位置制定焊接

表3 熔敷金属化学成分(质量分数) (%)

焊条直径 / mm	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Cr	Mo	Nb	Fe
3.2	0.05	0.30	3.0	0.01	0.01	68.3	0.05	13.4	6.3	1.4	6.1
4.0	0.07	0.40	2.8	0.01	0.01	69.3	0.04	13.0	6.3	1.7	4.8

表4 熔敷金属力学性能

焊条直径 / mm	屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	伸长率 (%)	冲击吸收能量 (-196°C) / J
3.2	455	705	44	88; 84; 89
4.0	431	693	47	87; 93; 105

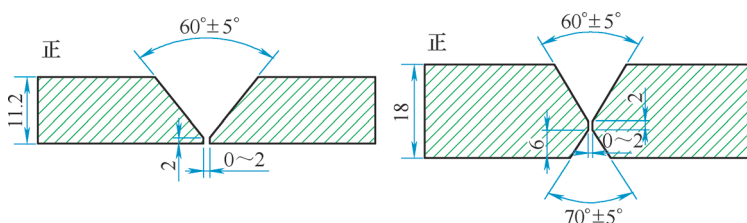


图2 坡口形式

参数,采用交流焊接,焊接过程中严格控制热输入量,采用多层多道焊的形式,短弧操作,焊条电弧焊摆动宽度不超过三倍焊芯直径,制定的焊接参数如表5所示。

3. 焊接工艺评定

按照IGC规则和LR规范要求,根据以上制定的焊接工艺,选用厚度为18mm的板材分别进行四组焊接工艺评定试验,评定编号为L1701、L1702、L1703、

表5 焊接参数

焊接位置	焊接方法	层数	规格 ϕ/mm	极性	焊接电流 / A	电弧电压 / V	焊接速度 / $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$	热输入 / $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$
平焊位置 (D)	SMAW	正 1~2	3.2	AC	90~110	20~22	11~13	8.3~13.2
	SMAW	正 3~n	4.0	AC	140~170	22~24	12~35	5.3~20.4
	SMAW	反 1~n	4.0	AC	140~170	22~24	12~35	5.3~20.4
横焊位置 (X)	SMAW	正 1~2	3.2	AC	130~150	21~23	14~18	9.1~14.8
	SMAW	正 3~n	3.2	AC	130~150	21~23	15~40	4.1~13.8
	SMAW	反 1~n	3.2	AC	130~150	21~23	15~40	4.1~13.8
立焊位置 (Vu)	SMAW	正 1~2	3.2	AC	100~120	21~23	9~15	8.4~18.4
	SMAW	正 3~n	4.0	AC	120~140	22~24	8~12	13.2~25.2
	SMAW	反 1~n	4.0	AC	120~140	22~24	8~12	13.2~25.2
仰焊位置 (O)	SMAW	正 1~2	3.2	AC	110~130	20~22	10~15	8.8~17.2
	SMAW	正 3~n	3.2	AC	110~130	20~22	8~20	6.6~21.5
	SMAW	反 1~n	3.2	AC	110~130	20~22	8~20	6.6~21.5

L1704，对应于平焊、横焊、立焊、仰焊位置。

试件焊接完48h后，经100%RT+100%PT检测无缺陷后取样进行横向拉伸、全焊缝拉伸、弯曲、冲击、宏观、硬度等试验项目，试验结果如表6~表10所示，宏观检测试样如图3所示。

从试验结果可以看到，四组评定试验横向拉伸试验所得值均高于母材标准规定最小抗拉强度640 MPa，全焊缝拉伸试验所得值高于焊材标准规定的最小屈服强度375 MPa，最小抗拉强度600MPa，最低伸长率25%，弯曲试验试样受拉表面无缺陷，横向冲击试验试样平均冲击功值均大于标准规定的最小值27J，宏观检测显示焊缝成形良好，完全焊透，无裂纹、未熔合、气孔等缺陷。硬度检测结果HV值均小于标准规定的最大值HV420，试验结果符合IGC规则和LR规范要求，表明制定的焊接工艺可以保证焊接接头的各项性能满足标准规范要求。

4. 焊接工艺应用

为保证现场施工焊接质量，制定施工焊接技术要求如下。

（1）焊接材料使用要求 伊萨OK92.55焊条为真空包装，首次使用不需进行烘焙，拆包装可以直接使用，但规定在8h内用完（最高环境温度35℃，最大相对湿度90%），8h内未用完焊条再重新使用前应进行200~300℃、烘焙1h，烘焙后的焊条存放在120℃保温箱中备用，焊工应持干燥完好的焊条保

表6 横向拉伸试验结果

试样编号	试验温度	抗拉强度/MPa	断裂部位和特性
1701-1	室温	710	塑断于母材
1701-2		700	塑断于母材
1702-1	室温	705	塑断于母材
1702-2		710	塑断于母材
1703-1	室温	705	塑断于母材
1703-2		695	塑断于焊缝
1704-1	室温	710	塑断于焊缝
1704-2		695	塑断于焊缝

表7 全焊缝拉伸试验结果

试样编号	试验温度	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断面收缩率(%)	伸长率(%)
1701	室温	510	710	43.5	40.5
1702	室温	645	705	41.0	39.0
1703	室温	655	735	30.0	37.0
1704	室温	590	730	32.5	33.5

表8 弯曲试验结果

试样编号	试样类型	压头直径/mm	弯曲角度（°）	试验结果
1701	侧弯	40	180	合格（4件）
1702	侧弯	40	180	合格（4件）
1703	侧弯	40	180	合格（4件）
1704	侧弯	40	180	合格（4件）

表9 冲击试验结果

试样编号	缺口部位	试验温度/℃	试验尺寸/mm×mm×mm	冲击吸收能量/J	平均值/J
1701-1	焊缝中心	-196	10×10×55	97.2；97.7；91.6	96
1701-2	熔合线	-196	10×10×55	131；115；106	117
1701-3	熔合线+1mm	-196	10×10×55	142；183；159	161
1701-4	熔合线+3mm	-196	10×10×55	249；233；271	251
1701-5	熔合线+5mm	-196	10×10×55	227；234；196	219
1701-6	母材	-196	10×10×55	221；222；224	222
1702-1	焊缝中心	-196	10×10×55	105；110；101	105
1702-2	熔合线	-196	10×10×55	107；120；98.2	108
1702-3	熔合线+1mm	-196	10×10×55	115；135；127	126
1702-4	熔合线+3mm	-196	10×10×55	136；180；142	153
1702-5	熔合线+5mm	-196	10×10×55	201；203；208	204
1702-6	母材	-196	10×10×55	161；201；193	185
1703-1	焊缝中心	-196	10×10×55	94.5；101；94.8	97
1703-2	熔合线	-196	10×10×55	98.3；102；83	94
1703-3	熔合线+1mm	-196	10×10×55	105；108；105	106
1703-4	熔合线+3mm	-196	10×10×55	223；221；172	205
1703-5	熔合线+5mm	-196	10×10×55	200；186；216	201
1703-6	母材	-196	10×10×55	211；191；209	204
1704-1	焊缝中心	-196	10×10×55	88.2；99.3；91.7	93
1704-2	熔合线	-196	10×10×55	113；90.1；89.8	98
1704-3	熔合线+1mm	-196	10×10×55	122；140；110	124
1704-4	熔合线+3mm	-196	10×10×55	181；209；199	196
1704-5	熔合线+5mm	-196	10×10×55	197；209；175	194
1704-6	母材	-196	10×10×55	207；202；192	200



图3 宏观检测试样

温筒（加热至120~140℃）领用和存放，焊条烘焙次数不超过两次。

（2）焊接人员资质要求 焊接操作人员（包括装配点焊人员）应按照LR规范要求，进行相应位置考试，通过验船师认证，现场佩戴合格证件，才可进行产品施焊。

（3）施焊技术要求 ①严格执行焊接参数，采用交流焊接。②坡口两侧各30mm范围内，对9Ni钢板用不锈钢丝刷和专用氧化铝砂轮片，打磨清洁去除氧化皮、铁锈、油污、水分及其他污物，坡口表面应光洁平整，无毛刺、裂纹等缺陷。③角焊缝接头两侧各30mm宽度内的车间底漆打磨去除，切割端面的氧化皮等杂质也需打磨去除。④焊条操作要求：起弧后稍向后拖一下电弧，将起弧点重熔以防止缺陷，使用电弧长度尽量短，电焊条与法线角度约为10°~15°，绝对不得超过45°，在接头的末端熄弧点的位置需向后方移动10~15mm。焊接接头位置需要注意，在下一层焊之前需要打磨清理干净，点焊位置的焊渣清理干净，焊接时不得在有裂纹的焊点上。⑤道间温度控制在≤150℃范围内。⑥定位焊要求：定位焊长度50~80mm，间距250~300mm。⑦罐体上临时卡马、排、吊马等严禁用榔头野蛮敲除，应选用割

表10 硬度检测结果 (HV)			
评定编号	试样编号	测试形式及载荷	硬度范围
L1701	1701	HV, 98N	母材
			热影响区
			焊缝
L1702	1702	HV, 98N	母材
			热影响区
			焊缝
L1703	1703	HV, 98N	母材
			热影响区
			焊缝
L1704	1704	HV, 98N	母材
			热影响区
			焊缝

刀割到距母材约2~3mm处，然后打磨磨平，做PT检测表面无缺陷。⑧双面焊反面清根打磨后，做PT检测，无裂纹、气孔等缺陷后再进行施焊。⑨当焊条必须在潮湿、雨天、多风和寒冷的露天场地进行时，应对焊接作业区域提供适当的遮蔽和防护措施，当周围风速>2m/s时，需要在焊缝周围布置挡风板。⑩要求9Ni钢板边剩磁不超过50高斯，吊装采用真空吸盘吊或卡钩。

5. 结语

（1）船用LNG液罐9Ni材料，供货状态为淬火加回火（QT），采用焊条电弧焊方法，选用型号为ENiCrMo—6的伊萨OK92.55焊条，焊前不预热，焊后不进行消应力热处理，道间温度控制在≤150℃范围内，焊接热输入量控制在4.1~25.2kJ/cm，多层多道焊，经平、横、立、仰四种位置焊接工艺评定试验。试验结果表明，制定的工艺可以保证焊接接头各项性能满足标准规范要求。

（2）焊接工艺在产品焊接应用中，应按技术要求合理使用和烘焙焊条，焊接人员应通过标准规范要求的焊工考试，加强焊前清理工作，严格执行焊接参数，采用合理的焊接收弧方法，采取适当措施降低钢板剩磁，增加必要的表面检测手段，以确保现场焊接施工质量。

参考文献：

- [1]徐洲凯，罗晓钟等. 国内C型LNG船用运输罐建造技术概述[J]. 辽宁化工，2016（3）：365-367.
- [2]刘扬，等. 9Ni钢的焊接技术[J]. 焊接技术，2008（10）：52-54.
- [3]吴智武，等. LNG储罐用9Ni钢的焊接材料与工艺[J]. 焊接技术，2009（8）：40-41.

作者简介：赵瑞辉，中船圣汇装备有限公司。

MW 20171017