LNG低温储罐用9%Ni钢不同焊接工艺对比研究

苏衍福　任胜汉　刘伯胜　刘海林　蔡忠彪　夏福龙　刘海英

【摘要】通过对目前国内外使用的9Ni钢焊接材料的调研筛选，最终选择了三种焊条电弧焊条和两种药芯焊丝作为试验焊材进行焊接试验，并从焊材的操作工艺性、焊接效率、焊后无损检测及力学性能等方面进行了对比分析，认为5种焊材均有优良的焊接性能，但焊接效率和焊后性能有所差别。

关键词：9%Ni钢；焊接；药芯焊丝；手工焊条

目前世界上建造的LNG储罐越来越多，9%Ni钢是国际上LNG储罐广泛使用的钢种。但是9%Ni钢的技术含量高，焊接难度大，该钢种在焊接冶金反应和热循环的作用下，其组织和成分改变，产生脆硬相，低温性能降低，冷裂纹、热裂纹倾向增大，对焊接材料性能要求严格，因此本文对用于9%Ni钢焊接的三种进口手工焊条及两种药芯焊丝进行了焊接试验。

1. 焊接试验材料

（1）试验母材　本文中的所有试验板材均来自同一9%Ni钢板，该钢板由国内某钢厂生产，根据材质证书的数据，材料的化学成分及各项力学性能如表1、表2所示。由表1可知，试验用钢板的碳当量为0.341%＜0.4%，所以焊接性良好。

本文试验进行立向上焊接，均采用单面V形坡口，坡口的加工均采用机加工方式，在焊接之前，用专用的砂轮和钢丝刷将坡口周围打磨光亮。坡口形式如图1所示。

（2）试验焊材　本文讲述的是LNG低温储罐的立焊缝，即不能使用埋弧焊的焊口作为研究对象。目前9%Ni钢的立焊基本使用焊条电弧焊，但是也有对药芯气体保护焊的相关报道。本文作者经过对国内外多家生产9%Ni钢焊材的厂家进行调研和技术交流，最终选定了几种用于9%Ni钢的焊材，其中包括焊条电弧焊焊条、气体保护药芯焊丝。这些焊材的分类及AWS分类号如表3所示。

选择这几种焊材的目的，是为了考察不同焊材组成成分对焊接性能的影响。这几种均是专用于9%Ni钢的焊材，具有优良的低温特性，如表4所示。

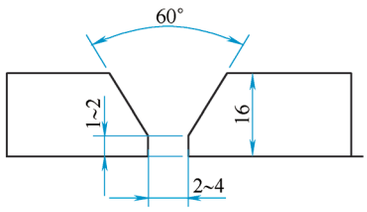


图1　坡口形式

表1　9%Ni钢化学成分（质量分数）　（%）

C	Si	Mn	P	S	Ni
0.0341	0.228	0.568	0.002	0.001	9.082
Mo	V	Cr	Cu	Al	Ti
0.001	0.001	0.011	0.006	0.031	0.002

表2　9%Ni钢各项力学性能

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率（%）	冲击吸收能量/J（-196℃）	侧向膨胀值/mm	弯曲
640	690	24.0	186	2.0	合格

表3 试验焊材种类及分类号

焊材编号	焊材种类	焊材分类号
F1	焊条电弧焊焊条	ENiCrFe—9
F2	焊条电弧焊焊条	ENiMo—9
F3	焊条电弧焊焊条	ENiCrFe—4
F4	气体保护药芯焊丝	ENiCrMo3T1—4
F5	气体保护药芯焊丝	ENiCrMo3T1—4

对于手工电弧焊条，在焊接开始之前需要在300~350℃下烘干1h，去除焊条内的水分。而药芯焊丝则不需要进行烘干，打开真空包装即可使用。

2. 试验结果对比

（1）焊接工艺性对比　从现场的焊接操作来看，F1的操作性能要优于F2和F3，但是从表5的参数来看，F1的焊接电流和焊接速度要小于F2和F3，在现场也尝试提高F1的焊接电流，但若提高焊接电流过大，会引起焊条皮烧红，破坏工艺性。但是在正常电流下焊接，F1的药渣覆盖效果明显要好于F2和F3的覆盖效果，F1焊条焊接完毕，药渣覆盖完好，而F2和F3焊缝上的药渣覆盖不完全，焊接熔池冷却后，有的地方无药渣覆盖，直接裸露氧化的金属，这样可能会引起表面出现气孔。三种焊条焊完的药渣覆盖效果如图2所示。

两种药芯焊丝的操作性基本没区别，但是F4的自动脱渣性要比F5的好，如果使用工具去除，基本不存在药渣难以去除的情况。两者在收弧处容易出现明显的气孔或者气孔和小裂纹，封底焊道尤为明显（见图3），需要在重新起弧之前进行认真打磨。

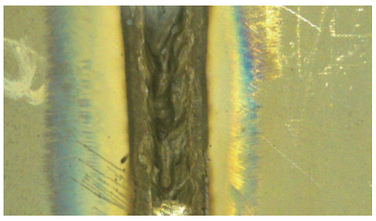
（2）焊接效率对比　焊条电弧焊和气体保护药芯焊丝焊完一块试板所用时间对比如表5所示。

从表5可以看出，焊条电弧焊中，F1比F2和F3的焊接速度较低，焊接时间较长，效率稍低。两种药芯焊丝的焊接速度与焊接时间基本一样。药芯焊丝与三种焊条相比，效率提高了40%左右。在LNG这种大型的低温储罐施工过程中，由于立焊不能使用埋弧焊，所以目前主流还是使用焊条电弧焊。如果使用药芯焊丝替换焊条电弧焊，将极大提高建造效率。

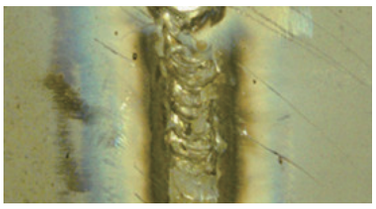
（3）无损检测结果对比　对五块完成的焊接试件进行焊后无损检测，检测包括渗透检测和射线检测。从检测结果来看，焊条电弧焊和药芯焊丝完成的试件表面均会出现不同数量的微小气孔和微小裂纹。但从整体来看，药芯焊丝完成试件的表面渗透检测情况要好于焊条电弧焊焊条完成的试件。这些微小气孔和微小裂纹都是表面缺陷，经过打磨和再次渗透检测后，已经检

表4 试验焊材的力学性能

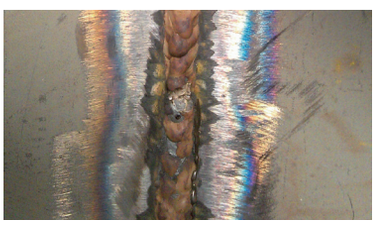
屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率（%）	冲击吸收能量/J（-196℃）			
455	711	43	70	61	64	Ave=65
439	759	49	106	100	106	Ave=104
457	750	38	50	54	54	Ave=53
501	788	42	—	—	—	Ave=70
≥450	≥690	25	—	—	—	≥60



（a）F1药渣覆盖效果



（b）F2药渣覆盖效果



（c）F3药渣覆盖效果

图2　不同焊条焊接后药渣覆盖效果

（a）封底焊出现气孔和裂纹

（b）填充焊出现气孔

图3　药芯焊丝焊道收弧处气孔和裂纹

表5　不同焊材的焊接参数

焊材编号	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接时间/min	保护气体	焊接速度/cm·min^{-1}	热输入/kJ·mm^{-1}
F1	82~120	27~30	88.41	—	74.83	1.7~2.8
F2	83~130	20~26	96.48	—	83.9	0.94~2.7
F3	83~131	22~24	93.2	—	85.3	0.9~2.24
F4	120~170	24~25	55.83	Ar/CO_2	119	1.56~2.19
F5	125~163	24~25	55.4	Ar/CO_2	122.8	1.47~2.37

测不到缺陷。

从射线检测的结果来看，焊条电弧焊和药芯焊的试件均出现不同数量的气孔，但气孔尺寸都在可接受范围之内。

（4）焊接力学性能对比　五种焊材焊完的试验件，对焊接接头进行拉伸试验、弯曲试验、冲击试验、宏观试验及硬度试验等力学性能测试，测试结果如表6所示。

从表6中可以看出，除了F1完成的试件有拉伸试验件断于焊缝，其他均断于母材，而且根据标准规定，该断于焊缝的试件的拉伸强度高于母材的最小名义拉伸强度即可判定合格，母材规定的最小名义拉伸强度为680MPa，所以试件的强度是符合标准的。

从各试件的试验结果来看，F1的焊材完成试件的焊缝和熔合线的冲击吸收能量值安全储量较大，F3的焊缝中心的冲击吸收能量均值为70J，接近要求下限。而药芯焊丝F5的熔合线处的冲击吸收能量值最小，但仍满足要求。

各个试件在冲击试验完毕后，对冲击试样进行侧向膨胀量测量，最下膨胀量为0.85mm，规定要求最小为0.38mm，所以测量值均满足要求。

从维氏硬度试验的测试结果来看，硬度值大部分在200~300HV10之间，各试件的最高硬度值出现在F4焊件的热影响区内，但是这个值远低于标准要求的450HV10。

3. 结语

本文通过对用于9%Ni钢焊接的三种进口手工焊条及两种药芯焊丝进行了焊接试验，并从焊材工艺性、焊接效率、无损检测结果及力学性能测试结果进行了对比，得到如下结论。

（1）三种焊条的工艺性有所差别，从操控性和药渣的覆盖效果对比，F1焊条要好于F2和F3焊条。两种药芯焊丝的工艺性基本一致，但收弧接头需要打磨。

（2）药芯焊丝焊接过程不仅节省了焊条更换的时间，而且减少了多个接头间打磨时间，焊接效率明显高于焊条电弧焊。

（3）焊后的无损检测和力学性能检测对比来看，焊条电弧焊由于接头较多，出现表面微小裂纹和微小气孔的概率要高于气保护药芯焊，但是力学性能没有太大差别，均满足标准要求。

表6　不同焊材完成试件的接头力学性能对比

焊材编号	拉伸强度		弯曲试验（180°弯曲）	冲击试验（-196℃）/J				侧向膨胀量/mm			硬度试验 $HV10_{max}$
	强度/MPa	断裂位置									
F1	697	母材	合格	84	88	92	101	1.42	1.71	1.46	348, 合格
	688	焊缝		100	131	126	119	1.08	1.37	1.50	
F2	726	母材	合格	89	102	95	95	1.46	1.55	1.43	336, 合格
	711	母材		178	168	150	165	1.83	1.58	1.43	
F3	710	母材	合格	66	73	70	70	1.29	1.27	1.60	332, 合格
	704	母材		102	120	82	101	1.34	1.66	0.85	
F4	708	母材	合格	70	74	84	76	1.10	1.23	1.30	397, 合格
	695	母材		106	126	113	115	1.31	1.86	1.21	
F5	707	母材	合格	85	86	96	89	1.31	1.27	1.12	330, 合格
	711	母材		99	92	91	94	1.19	1.22	1.22	

参考文献：

[1] 尹长华，等.LNG低温储罐用9%Ni钢的焊接[J]. 焊管，2009（9）：31-37.

[2] 王斌，綦国新.LNG储罐国产06Ni9低温钢的焊接工艺评定[J].化工设备与管道，2010（10）：66-70.

[3] 陈建平，等. 9Ni钢混合气体保护半自动焊焊接工艺[J]. 焊接技术，2009（9）：56-57.

作者简介：苏衍福等，海洋石油工程股份有限公司。

MW 20170620