06Ni9钢中薄板焊条电弧焊焊接工艺试验研究与应用

陕西化建工程有限责任公司 （杨凌 712100） 张啊妮 袁黎明

【摘要】我公司承担安装建设的延长气田延气2井区天然气液化厂10 000m³ LNG低温储罐，内罐采用06Ni9钢材料，板厚分别为10mm、8mm、6mm三种规格。薄板焊接由于散热条件差、焊接应力与变形具有复杂性和多元性，现场施工焊接质量控制难度大，本文通过对焊接工艺试验研究提出了满足质量要求的焊接工艺，在实际应用中取得成功。

1. 概述

随着对液化天然气LNG需求的增加，06Ni9钢作为其贮罐用钢已被普遍采用，且贮罐结构不断向大型化方向发展。然而大型储罐多采用厚板焊条电弧焊及埋弧焊工艺，目前尚未采用薄板进行焊接。

我公司安装建设的LNG储罐内罐采用06Ni9钢薄板制作，直接与冷冻LNG接触，长期服役于－168℃的低温环境。薄板焊接由于散热条件差，焊接应力与变形具有复杂性、多元性，现场施工焊接质量控制难度大等因素，一直是国内外薄板焊接制造的一个技术难题。目前在国内只有极少数的施工企业有施工业绩，因此，研究开发06Ni9钢焊接工艺，保证焊接低温容器的安全，对国产06Ni9钢的焊接工艺及组织性能进行研究有着重要的工程意义。

本文获得“中国安装协会焊接专业委员会2012年年会暨焊接标准及先进焊接技术研讨会”论文大赛二等奖。

+ SAW一个坡口约需2h（包括道间温度过高时的冷却时间），因此在管道预制厂进行管道二接一、场站管段预制时应优先采用全自动TIG/MAG+SAW组合焊工艺，自动焊焊接质量稳定效率高，但因对集输管道现场适应性差，难以完成全部野外管道焊接。

（2）氩－电联焊 这种焊接方法在厚壁小口径管道具有较好的适应性，焊接质量较好，尽管焊接速度慢，但仍是返修及连头施工较常应用的工艺。

（3）焊接注意事项 当采用氩弧焊打底，焊条电弧焊填充一道，半自动药芯焊丝下向焊焊接时，在现场施工适应性好，施工效率高于焊条电弧焊，但需注意扩散氢影响，做好消氢处理等工艺措施，防止焊缝脆性断裂、冲击韧度偏低等现象出现。在采取相应工艺措施后可应用于线路工程施工。

5. 工程应用

按上述试验成果编制相应焊接工艺评定，制定相应焊接规程，并应用于某气田储气库注采试验集注试验站工程施工，完成ϕ273mm×28mm注采管线约2.5km，采用TIG+SMAW+ MAG（全自动）组合焊完成站内工艺管道焊接预制，采用全自动TIG/MAG+ SAW焊接完成了“二接一”管道预制，连头/返修焊接采用焊条电弧焊完成，因TIG+SMAW+FCAW 在工程期间扩散氢试验未完成，所以并未在工程中应用，还有待进一步研究验证 。MW

（20120830）

2. 焊接技术难点

（1）06Ni9钢在供货状态下具有良好的低温韧性，但在焊接冶金反应和热循环的作用下，熔合线的成分及热影响区的组织均将发生变化，破坏了材料的原始热处理状态，使得低温韧性下降，脆性组织生成，呈现较大的冷裂倾向。

（2）由于焊缝金属中奥氏体几乎占100%，无第二相存在，因此，抗热裂纹能力较差。

（3）06Ni9钢磁化倾向较大，电弧的磁偏吹将严重影响焊接质量，甚至会影响焊接的正常进行。

综上所述，因焊接金属和母材的冷热裂纹倾向、焊接冶金反应和热循环造成的低温韧性下降，以及母材的磁化倾向等诸多因素是影响06Ni9钢焊接质量的主要原因。

3. 焊接工艺研究

（1）试验材料　06Ni9钢成为制造大型低温储罐的主要材料之一。钢中添加的9%（质量分数）Ni是形成和稳定奥氏体的重要元素，太钢生产的三种规格板材的化学成分如表1所示，力学性能如表2所示。Ni元素含量的增加可以提高C在马氏体内的活度，增大C的扩散系数，提高残留奥氏体的含量，改善材料的性能，降低脆性转变温度。

表1　国产06Ni9钢的化学成分（质量分数）　（%）

板厚/mm	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu
6	0.041	0.241	0.658	0.0018	0.002	0.006	9.312	0.002	0.002	0.005
8	0.0342	0.179	0.630	0.002	0.002	0.009	9.301	0.001	0.002	0.004
10	0.0411	0.277	0.658	0.003	0.002	0.028	9.675	0.002	0.002	0.005

表2　国产06Ni9钢的力学性能

板厚/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率(%)	冲击吸收能量（-196℃）/J			侧向膨胀率(%)≥0.64			纤维断面率(%)≥75		
6	700	760	25.6	67	69	67	–	–	–	–	–	–
8	694	727	20.5	116	76	110	1.7	1.58	1.66	100	100	100
10	708	750	21.5	103	78	103	1.5	1.3	1.5	100	100	100

在LNG储罐焊接中，最常用的电弧焊焊条就是ENiCrMo—6，其化学成分、力学性能如表3、表4所示。由表可看出焊条的含碳量与06Ni9钢相同、w_{Ni}高达55%以上，可有效阻止碳迁移、避免粗晶区产生脆性组织。焊缝金属组织为奥氏体组织，具有良好的低温韧性，从而保证了粗晶区低温韧性，熔敷金属力学指标满足母材要求，对应于06Ni9钢材料，690MPa的抗拉强度和-196℃时70J的冲击值是主要的性能指标。

表3　ENiCrMo—6焊条化学成分（质量分数）　（%）

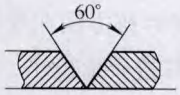
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu	Fe	W
0.04	0.3	2.7	0.01	0.01	12.7	68.3	6.2	1.4	<0.01	4.6	1.6

表4　ENiCrMo—6焊条力学性能

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率（%）	冲击吸收能量（-196℃）/J
430	690	40	70

（2）坡口加工　06Ni9钢板采用机械切割，坡口加工后应清理其加工表面。焊件组对前，对坡口两侧各50mm范围内进行清理。油污可用蒸汽脱脂，对不溶于脱脂剂的漆和其他杂物，用氯甲烷、碱等清洗剂清洗，标记墨水可用甲醇清除，被压入焊件表面的杂物可用磨削、喷丸或10%盐酸溶液清洗，并用水冲洗干净，干燥后进行焊接。坡口形式及尺寸如表5所示。

表5　06Ni9钢的坡口形式及尺寸

坡口形式	焊接位置
	横焊
	平焊、平仰焊、立焊

（3）焊接试验工艺规范　由于06Ni9钢是在-169℃低温，甚至是-196℃的超低温下工作，所以焊接接头必须有良好的低温韧性，并且必须避免接头过热和晶粒长大。而薄板焊接散热慢，焊接容易变形，因此为获得性能良好的接头组织，从焊接

工艺上考虑应采取以下措施。

第一，焊前不预热并且严格控制层间温度。因为预热温度和层间温度直接影响了焊后的冷却速度，冷却速度越慢，越有利于晶粒的长大，所以06Ni9钢的焊接一般不需要预热，层间温度不宜超过100℃。

第二，采用小热输入多层多道焊。焊接热循环直接影响到焊接接头的组织、性能和晶粒大小。由于热输入越大，焊接热循环中的高温停留时间越长，冷却速度越慢，接头组织晶粒就越粗大，因此焊接06Ni9钢必须严格控制热输入。其措施一般采用多层多道焊，有利于控制接头热输入，而且后道焊缝对前道焊缝有回火的作用，细化晶粒组织，提高接头性能。

第三，尽量选用交流极性电源。06Ni9钢是一种强磁性材料，极易被磁化，采用直流电源时易产生磁偏吹现象，影响焊接工艺的稳定性，直接影响到接头的质量。

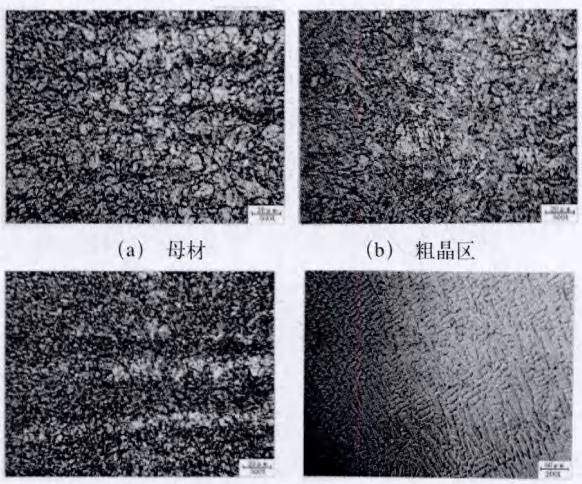
综合研究，经过大量的试验，根据板厚选择焊条直径，确定06Ni9钢的焊接工艺及焊接参数如表6所示。

表6　06Ni9钢焊条电弧焊焊接参数

板厚/mm	焊条直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	热输入/kJ·cm^{-1}	坡口形式
6	2.5、3.2	75～105	21～23	≤6.5	V
8	2.5、3.2	80～110	21～23	≤8	V
10	2.5、3.2	80～110	21～23	≤12	V

4. 试验结果及分析

（1）焊接接头金相组织　根据表6中的焊接参数进行焊接，其接头部位的金相组织如图1所示。



(a) 母材　(b) 粗晶区　(c) 细晶区　(d) 焊缝区

图1　焊接接头金相组织

经研究分析焊条电弧焊接头金相组织母材区为回火马氏体，细晶区组织结构为回火马氏体，粗晶区为回火马氏体，但组织比较粗大，焊缝区为奥氏体枝晶状γ相。焊接接头成形较好，未见裂纹、未熔合、气孔及未焊透等缺陷产生。宏观金相如图2所示。

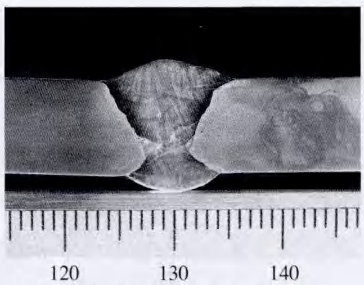


图2　焊接接头宏观金相

（2）焊接接头力学性能　低温试验按照GB/T229—2007标准实施。使用工艺评定试板取10mm×10mm×55mm的全尺寸进行试验，若无法制备全尺寸冲击试样，则采用7.5mm×10mm×55mm或5.0mm×10mm×55mm 小尺寸试样，其冲击吸收能量按比例缩减。要求一套试样取自焊缝金属，另一套试样取自热影响区。每套试样应由三个试件组成。焊接金属和热影响区开V形缺口，冲击试件应垂直焊缝，在母材金属表面以下最多2mm位置处提取，V形缺口应垂直于焊缝外表面加工。

在热影响区中，缺口距离熔合线1～2mm，在焊缝金属中，缺口应位于焊缝中心线。规定试验温度为－196℃。焊接接头低温冲击试验结果如表7所示。

表7　06Ni9钢焊接接头冲击试验结果

板厚/mm	试样尺寸/mm	冲击吸收能量/J							
		焊缝金属				热影响区（－196℃）			
		1	2	3	平均值	1	2	3	平均值
8	5.0×10×55	40	40	40	40	110	104	105	106.3
10	5.0×10×55	39	41	43	41	66	64	61	63.67

试验数据表明，热影响区的低温冲击吸收能量比焊缝处要高，表现出了良好的低温韧性。

原因有以下几方面：

第一，热影响区的粗晶区很窄，且在多层焊中后续焊道的再热形成的细晶交错在一起，采用多层多道焊在某种程度上细化了组织晶粒，使其性能提

高，相比之下，焊缝区由于热量集中，在焊缝中心形成粗大的枝晶状γ相，导致焊缝区的低温冲击韧性较差。

第二，热输入是影响低温韧性的主要工艺参数，在焊接条件下，随着热输入的增加，冷却后的组织更加粗大，导致低温韧性下降，层间温度提高时，马氏体的自回火作用更加显著，有利于低温韧性的提高。因此在焊接时应严格控制焊接热输入和层间温度。

第三，冲击试样断口表面呈现韧窝形貌，且细小，低温冲击韧性高，如图3所示。

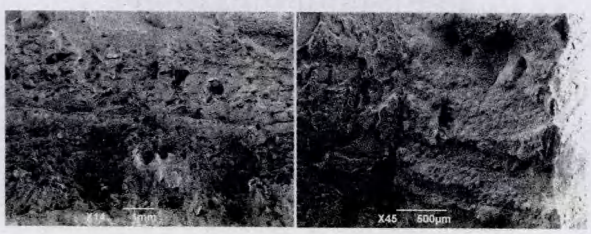


图3 焊缝处低温冲击试样扫描电镜

弯曲试验按照GB232—1999标准实施。试验形式为面弯、背弯，当试件厚度≥10mm时，可用4个侧弯来代替两个面弯和两个背弯试样。弯曲试验结果如表8所示。

表8 焊接接头弯曲试验结果

板厚/mm	弯曲角度(°)	弯轴直径/mm	弯曲类型	编号			
				1	2	3	4
6	180	40	面背弯	无缺陷	无缺陷	无缺陷	拉伸面上<3mm 裂纹两处
8	180	40	面背弯	无缺陷	无缺陷	无缺陷	无缺陷
10	180	40	侧弯	无缺陷	无缺陷	无缺陷	无缺陷

弯曲试验主要目的是考察焊接接头的塑性及显示缺陷，它是焊接工艺评定和产品焊接试板的重要检查项目。

由于焊接热输入对焊接接头的组织和性能不可低估，而层数、层间温度也影响了焊接接头的弯曲性能。如果焊接热输入大，焊后冷却的过程中，由于空冷到室温，导致焊缝金属经历一次热循环后，具有很长的时间结晶，致使金属在结晶过程中可能产生严重偏析，从而导致焊接接头性能下降。因此，试验过程中均采用多层焊，焊道薄而均匀，改善了结晶组织状态，从而减小了冷弯开裂的几率，提高了弯曲合格率。

另外，如果焊渣不能清理彻底，也会影响焊缝的致密性，造成焊缝性能降低。

拉伸试验按照GB/T228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》和JB4708—2000《钢制压力容器焊接工艺评定》实施，测定焊接接头拉伸时的屈服极限、抗拉强度。拉伸试验结果如表9所示。

表9 焊接接头拉伸试验结果

板厚/mm	抗拉强度/MPa		
	1	2	平均值
6	760	730	745
8	720	760	740
10	745	760	753

试验数据表明，采用表6中的焊接参数，焊接接头强度能够达到材料要求。

5. 应用实例

经评定合格的焊接工艺在延长集团勘探公司延安LNG10 000m^{3}低温储罐施工中应用取得了成功，储罐内罐所有对接焊缝经100%射线检测，取得了99%一次合格率的优良焊接质量。

6. 结语

经多次的工艺研究以及现场施工情况来看，工艺规范符合要求，能够达到施工标准。

（1）06Ni9钢焊接适合多道焊焊接。从微观组织来看，焊接接头母材为明显的马氏体组织，焊缝区为奥氏体枝晶状γ相，热影响区为回火马氏体组织。焊接接头成形较好，未见裂纹、未熔合、气孔及未焊透等缺陷产生。

（2）低温冲击试验的结果表明，06Ni9钢焊接实施多层焊，后道焊缝对前道焊缝有回火的作用，可细化组织晶粒，使低温韧性提高。

（3）弯曲试验的目的在于检查焊接接头的完好性和塑性，完好性就是连续性和致密性。采用小热输入多层焊可有效改善了结晶组织状态，提高弯曲合格率。

（4）由拉伸试验数据可以看出，采用表6中的焊接参数，焊后接头强度能够达到技术要求。**MW**

（20120825）