

9Ni 钢焊接接头组织及性能研究

张港荫¹ 周辰琳²

(1 苏州埃思哈焊接技术发展有限公司 江苏 苏州 215104; 2 上海勤合焊接技术发展有限公司 上海 200063)

摘要: 本文以 9Ni 钢为研究对象,进行了 9Ni 钢手工电弧焊 (SMAW)、钨极氩弧焊 (GTAW) 焊接试验,焊后利用光学显微镜观察 9Ni 钢焊接接头的显微组织,采用弯曲性能和硬度测试,研究 9Ni 钢焊接接头的力学性能并分析焊接工艺参数对焊接接头显微组织和力学性能的影响,优化焊接工艺。选用直径 4mm 的 Freezal Ni9 焊条焊接 9Ni 钢板,得到了 330HV,弯曲未发现裂纹;选用直径 2mm 的 ERNiCrMo-4 焊丝,进行钨极氩弧焊接,焊缝为树枝状奥氏体组织,热影响为回火马氏体组织,热影响区硬度最高为 300HV,焊缝区硬度最高为 260HV,比母材稍高,弯曲未发现裂纹。两种焊接方法显微组织和力学性能均满足使用要求,但钨极氩弧焊更优。

关键词: 9Ni 钢; 手工电弧焊; 钨极氩弧焊; 硬度; 弯曲性能

0 引言

国内液化天然气 (LNG) 工业蓬勃发展,规划有十多个 LNG 工程,有几十个十多万吨的 LNG 储罐需要焊接,而 LNG 储罐的材料无一例外均采用了 9Ni 钢^[1],原因在于 9Ni 钢具备优异的低温韧性和一定的强度。国内相关部门对 9Ni 钢以及相关焊接材料开展的试验研究,大多局限于非典型规格尺寸容器,现场实际焊接操作及使用的成熟经验欠缺,严重影响了我国 LNG 工业的发展以及在国内外市场中的竞争力。9Ni 钢的焊接技术是 LNG 低温储罐建造的关键性问题所在,9Ni 钢焊接接头性能的质量对储罐的施工质量是否达标与安全性能是否可靠起着至关重要的作用。而 9Ni 钢的焊接技术一直仅为日本、美国等少数工业发展快速的国家所掌握,相对应的焊接配套材料的制造技术及市场也被仅有的一些国际大公司所操控,极不利于国内生产的 9Ni 低温钢的推广使用。因此,为探索这种钢材的焊接规律,确保焊接大型 LNG 低温储罐的安全可靠性,本文针对 LNG 储罐用 9Ni 钢开展焊接性及其焊接接头的组织和性能的研究工作是十分必要的^[2]。

1 焊接试验选材

焊接试验母材选用 ASTM A553-95 TYPE 1 低温钢板,即 9Ni 钢,厚度为 $\delta=23\text{mm}$,工艺覆盖范围为 12 ~ 25mm。所用 9Ni 钢母材的化学成分以及力

学性能如表 1 和表 2 所示。

表 1 9Ni 低温钢化学成分 (质量百分含量 /%)

标准	C	Mn	Si	Ni	P	S
ASTEM A553 Type 1	< 0.13	< 0.98	0.13 ~ 0.32	8.5 ~ 9.5	< 0.0035	< 0.040

表 2 9Ni 低温钢力学性能

标准	屈服 /MPa	抗拉 /MPa	冲击功 -196℃ /J
ASTEM A553 Type 1	> 585	690 ~ 825	34/27

LNG 储槽储存的天然气的液化温度 (甲烷) 约为 -163℃,因此焊接的 9Ni 钢韧性对产品非常重要。考虑到镍基填充金属不仅在低温条件下显示出良好的断裂韧性,而且它们的热膨胀系数与 9Ni 钢非常匹配,抗拉强度亦是可匹配的。因此,试验选择 Freezal Ni9 焊条进行 9Ni^[3] 钢母材的手工电弧焊焊接试验,选用 ERNiCrMo-4 焊丝进行钨极氩弧焊接。

焊接试验中尤为注意的是,由于 9Ni 钢易产生电弧磁偏吹问题,因此应选用交流电源焊接,试验对接接头的焊接坡口示意图如图 1 所示。

试验中选用光学显微镜观察焊接接头的金相组织,在维氏硬度计上进行维氏硬度试验,并在万能试验机上进行弯曲性能测定试验。

2 焊接工艺

9Ni 钢在加工或运输过程中易被磁化^[4],焊接时

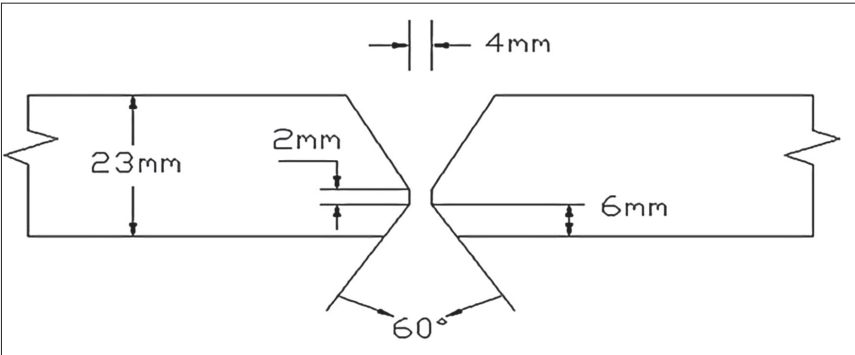


图 1 对接接头的焊接坡口示意图

易出现磁偏吹现象，焊前要测量磁性，若磁性偏大，必须去磁处理。焊前对焊缝及两侧 20mm 区域用不锈钢钢丝刷、砂轮等清除油污、铁锈、水等清理，焊接结束后清除杂物。

9Ni 钢中镍元素促使钢材的淬透性增大，经过淬火的组织为低碳马氏体，正火后的组织除低碳马氏体外，还有一定数量的铁素体和少量奥氏体，但由于含碳量很低，所以其冷裂倾向不大。镍基焊材作为填充材料，由于 S 和 Ni 容易生成低熔点共晶体，冷却时受到拉伸应力，可能引发热裂纹，因此宜选择小的热输入，焊接时为了减轻焊道过热情况，可运用小参数快速多道焊，凭借多层重热作用，能够给前一焊道产生细化晶粒作用，从而避免韧性降低、晶粒粗大问题。另考虑厚度的影响，选择焊前预热 50℃，焊接过程中注意控制层间温度，层间温度≤100℃。手工电弧焊的焊接参数如表 3 所示，钨极氩弧焊的焊接参数如表 4 所示。

表 3 手工电弧焊焊接工艺

焊接层数	填充金属		电流		电压范围 /V	焊接速度 / (cm/min)	热输入 / (kJ/mm)
	牌号	直径 /mm	类别	范围 /A			
1 ~ 2	E Ni9	4	AC	150 ~ 160	22 ~ 24	10	1.98
3 ~ 4	E Ni9	4	AC	150 ~ 160	22 ~ 24	15	1.32
5 ~ 6	E Ni9	4	AC	150 ~ 160	22 ~ 24	12	1.65
7 ~ 8	E Ni9	4	AC	180 ~ 190	22 ~ 24	6.5	3.65
9	E Ni9	4	AC	130 ~ 150	22 ~ 24	10	0.9

表 4 钨极氩弧焊焊接工艺具体参数

层次	电流种类	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 / (cm/min)	焊丝直径 /mm
1: 根焊	AC	115 ~ 130	9 ~ 10	9	2.0
3 ~ 8: 填充		90 ~ 115	9 ~ 10	7	
9 ~ 11: 盖面		90 ~ 115	9 ~ 10	7	

3 试验结果及分析

3.1 显微组织及分析

选择 Freezal Ni9 焊条进行 9Ni 钢母材的手工电弧焊焊接试验^[5]。焊接接头成型质量良好，对焊接试板进行切割，制作金相试样并侵蚀，得到图 2 中 9Ni 钢手工电弧焊的显微组织。从图 2 (a) 中可看到接头的三个清晰区域，分别为焊缝（左侧浅色部分）、热影响区（中间部分）以及母材（右侧深色部分）。图 2 (b) 为通过局部放大的焊缝组织图片，由图可知，焊缝、熔合区以及热影响区组成了接头，在熔合线附近也可看到存在比焊缝金属颜色更深的区域，此处为母材与焊缝金属并未完全混合的区域，该区域面积非常小，证明焊缝金属和母材熔合的少，靠近熔合区的焊缝部分，几乎无偏析现象，总体是奥氏体柱状晶均匀生长。然而，距离熔合区较远则会出现偏析现象，柱状晶间隙内存在大量偏析相，越往焊缝内部越能得到验证效果。母材的组织为回火索氏体，熔合线以外是正火区和粗晶区。焊缝金属由于加热和冷却速度非常快，组织形态与母材相比发生了明显的改变，它的组织为奥氏体柱状晶的非平衡态组织。由图 2 (c) 可以看到热影响区微观组织，其特征为过热区粗大的板条马氏体组织。

经过综合考虑，试验中选用 ERNiCrMo-4 作为钨极氩弧焊焊丝，焊丝成分和性能满足 AWSA5.14-97 的规定，焊接接头成型质量良好^[6]。图 3 为平焊位

置焊接接头焊缝组织的金相图片。其中, 3 (a) 为焊缝宏观形貌, 由图可知, 焊缝中奥氏体沿熔合线, 向焊缝中心生长。而结晶带可表明, 结晶过程是非连续进行的, 这与焊接工艺中的多层多道焊接方式相一致。3 (b) 是焊缝组织的微观形貌, 黑色线条是奥氏体晶界。3 (c) 为焊道交界处微观形貌, 黑色线条亦是奥氏体晶界, 析出相为图中亮区, 而其中的黑色点为第二相粒子。因为焊接热循环因素, 析出相分布在焊道交界处存在着显著区别, 即每一道焊缝中析出相多少不同。

3.2 硬度、弯曲测试结果及分析

对焊接接头的典型区域开展硬度分布测试工作, 测量平焊位置的维氏硬度, 从而准确评价焊接接头力学性能。图 4 为手工电弧焊和钨极氩弧焊对接接头的硬度曲线, 从图中可以看出两条曲线的走势基本相同, 两侧焊接热影响区硬度比焊缝高, 这是由于热影响区内有大量的含碳量高且晶粒粗大的马氏体生成。而焊缝位置虽然也经历了快速加热和冷却过程, 组织也发生了改变, 但其组织为硬度较低的

柱状奥氏体。而手工电弧焊热影响区与焊缝硬度差异更大, 热影响区硬度最高可达到 330HV, 焊缝硬度最低只有 220HV。

使用万能试验机, 对两种焊接方法的对接接头进行 120° 焊缝弯曲试验, 接头没有产生断裂或裂纹, 接头具有良好地韧性。

4 结语

选用直径 4mm 的 Freezal Ni9 焊条焊接 ASTM A553 type 1 型 9Ni 钢板, 在交流电源、电弧电压 22 ~ 24V、电流为 150 ~ 180A、焊接速度 10 ~ 15cm/min 下进行焊接, 热影响区组织为马氏体, 焊缝组织为柱状奥氏体。焊接接头弯曲 120° 没有出现裂纹, 焊接热影响区硬度比焊缝高, 达到 330HV。在试验参数下, 选用 ERNiCrMo-4 焊丝进行钨极氩弧焊, 焊接接头在 120° 弯曲时没有出现裂纹, 热影响区硬度最高为 300HV, 焊缝区硬度最高为 260HV, 稍高于母材。此项试验下的手工电弧焊和钨极氩弧两种焊接方法, 组织及性能都满足使用要求,

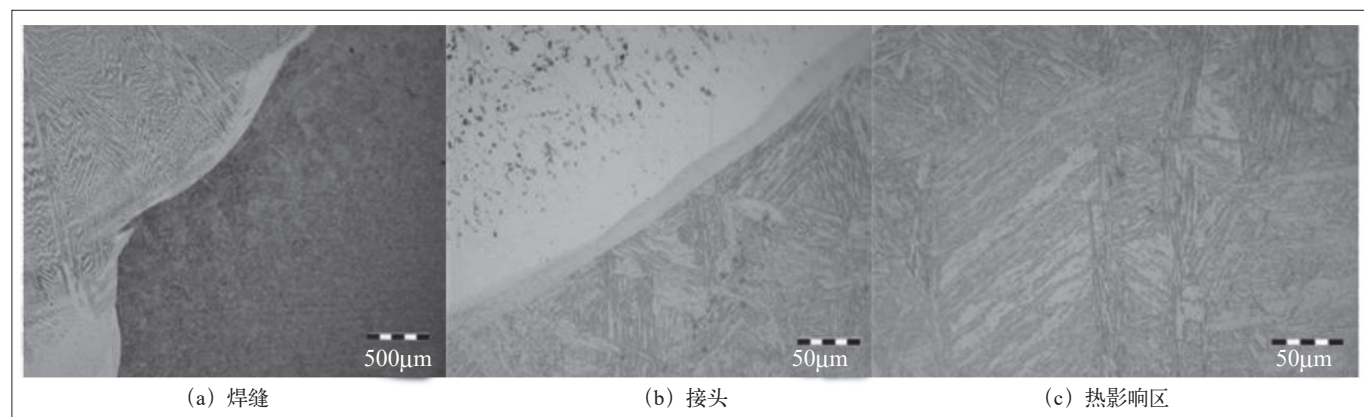


图 2 手工电弧焊对接接头显微组织

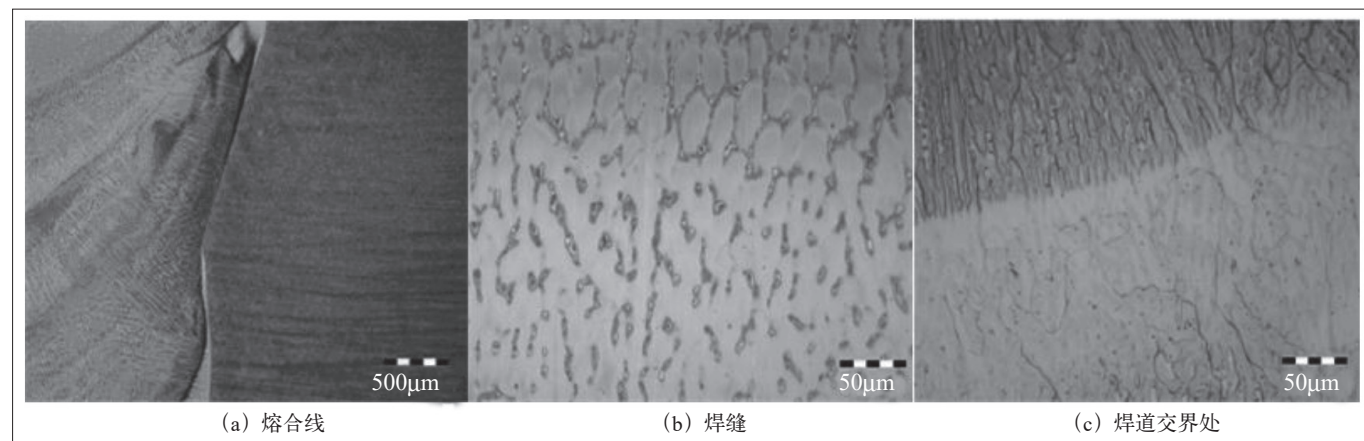


图 3 钨极氩弧焊焊接接头组织

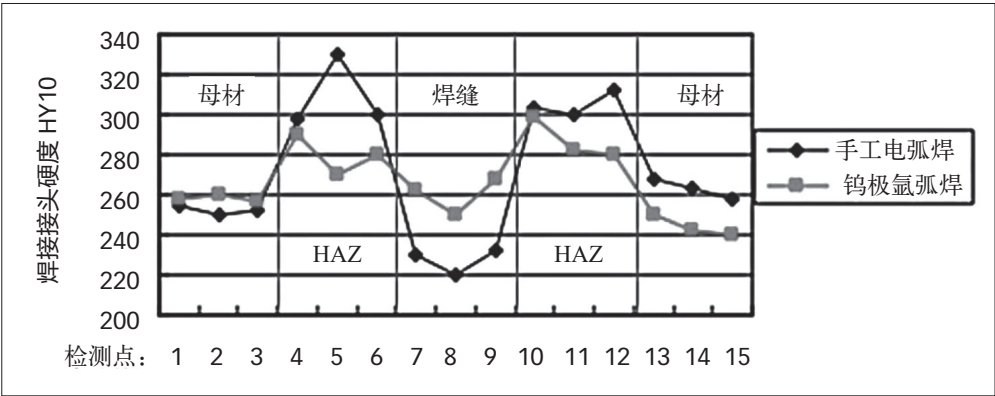


图 4 对接接头硬度曲线

但钨极氩弧焊更优。

参考文献：

[1] 吴智武, 王移山, 李少华, 等. LNG 储罐用 9Ni 钢的焊接材料与工艺 [J]. 焊接技术. 2009. 38(8):40-41.

[2] 张少东. LNG 用 9%Ni 钢的开发 [N]. 中国冶金报, 2007(7).
[3] 严春研, 李午申, 薛振奎, 等. LNG 储罐用 9% Ni 钢及其焊接性 [J]. 焊接学报, 2008, 29(3):50-52.
[4] 刘祥儒. 9Ni 钢低温储罐焊接施工经验与工艺问题探讨 [J]. 石油工程建设, 1997(5):14-18.
[5] 刘东风, 杨秀丽. 液化天然气储罐用超低温 9Ni 钢的研究及

应用 [J]. 钢铁研究学报, 2009, 21(9):1-5.
[6] 刘会杰. 焊接冶金与焊接性 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011:134-160.

作者简介: 张港荫 (1988.10-), 男, 汉族, 山西晋中人, 本科, 工程师, 研究方向: 焊接技术。