

9Ni 钢焊接技术研究

二零零八年四月

9Ni 钢焊接技术研究

摘要：随着我国能源战略布局的调整，液化天然气将成为我国越来越重要的能源。本文主要针对LNG低温储罐用的9Ni钢材料，通过对9Ni钢的性能及焊接性进行分析，进行了9Ni钢工艺评定试验，完成并制定了企业的焊接工艺评定报告。

本次研究通过企业科研立项审查，并作为企业技术储备。项目研究组通过对工程现场的调研，进行了手工电弧焊和埋弧自动焊两项焊接工艺试验，并通过了包括强度、拉伸、弯曲、低温冲击等试验。

关键词：9 Ni钢；LNG；低温韧性，冷裂纹，热裂纹，磁偏吹，低温冲击试验

The research of 9%Ni steel welding technology

Abstract: With energy strategy adjustment of our country, Liquefied natural gas will become more and more important energy in our country. This article mainly introduces 9Ni-steel material which is used in the LNG low temperature storage tank. Through the analysis to 9Ni-steel performance and weld-ability, craft evaluation experiment has been carried on 9Ni-steel, enterprise's welding craft evaluation report has been completed and formulated.

This research passed a project examination by enterprise scientific research department initially and will be as enterprise technological. Through the investigation to project scene, The project study team has done two welding test for manual arc welding and automatic submerged arc welding, and passed intensity, stretch, curving, low temperature impact experiments and so on.

Keywords: 9Ni-steel, LNG, toughness at Low temperature, cold crack, hot crack, magnetic blows, impact test at low temperature

目 录

第一章 9Ni钢在低温储罐中的应用	3
第一节 前言	3
第二节 9Ni钢焊接技术研究的意义	3
第二章 9Ni钢材料性能	3
第一节 9Ni钢组织成分	3
第二节 9Ni钢的化学成份和机械性能	4
第三章 9Ni钢焊接工艺	5
第一节 9Ni钢焊接性能	5
1、焊接过程可能产生的问题	5
1.1 冷裂纹	5
1.2 热裂纹	7
1.3 低温韧性下降	7
1.4 磁偏吹	8
2、9Ni钢焊接问题针对措施	8
2.1 冷热裂纹倾向的预防	8
2.2 焊接接头低温韧性的保证	9
2.3 克服磁偏吹的途径	10
第二节 焊接工艺评定	10
1、焊接工艺准备	10
2、手工电弧焊焊接工艺评定	10
2.1 设计坡口	11

2.2 坡口制备:	11
2.3 焊前清理:	11
2.4 焊接方法及焊接设备的选择:	12
2.5 焊接材料的选择:	12
2.6 焊接环境:	13
2.7 焊接工艺参数:	13
2.8 操作要点:	15
2.9 焊接检验及结果	15
3、埋弧自动焊焊接工艺评定	18
3.1 焊接设备及其焊接材料的选择	18
3.2 美国Miller交流方波电源的埋弧自动横焊机性能介绍	18
3.3 焊前准备和焊接工艺要点	19
3.4 焊接规范	19
3.5 焊接检验及结果	19
第三章 焊接工艺评定的相关内容	23
第一节 焊接工艺评定程序	23
第四章 结论.....	23
参考文献.....	24

第一章 9Ni 钢在低温储罐中的应用

第一节 前言

LNG 是液化天然气 Liquid natural gas 的英文缩写，天然气在 -165°C 时为液态，天然气的运输和储存是在液态下进行的。随着我国能源战略布局的调整，液化天然气将成为我国越来越重要的能源。目前液化天然气主要输出国为印尼、马来西亚、阿联酋、特力尼达和多巴哥，我国将成为主要的进口国。国家的“十一五”规划将在广东、福建、浙江、江苏、山东等沿海地区建多座大型液化天然气储运站以及伊朗的油气项目，每座储运站由 2×16 万 m^3 储罐、一个装卸码头、两万公里管道以及控制系统组成，安装市场前景非常广阔，但是目前进入该市场必须掌握 9Ni 钢的焊接性能，应该说具备 9Ni 钢的焊接能力是进入该市场的必备条件。

第二节 9Ni 钢焊接技术研究的意义

LNG 贮罐材料通常为低温钢（9Ni），属耐低温合金钢，本身耐低温 -196°C （LNG 储罐设计温度 -170°C ）。与普通碳钢比，9%镍钢在低温状态下具有抗冲压性能强、低温韧性好的特点，但其材质本身又具有易磁化、难消磁的缺陷，对焊接工艺的要求极为严格。

第二章 9Ni 钢材料性能

第一节 9Ni 钢组织成分

9Ni 钢是 1944 年开发的含 9Ni% 的低碳钢，始创于美国国际镍公司的产品研究试验室，使用温度最低可达 -196°C 。自 1960 年通过研究证明不进行焊后消除应力热处理亦可安全使用以来，9Ni 钢就成为用于制造大型低温贮罐的主要材料之一。

9Ni 钢在 ASME 标准为 A353，其组织取决于热处理方法，9Ni 钢的热处理方法一般可分为二次正火+回火（NNT）和淬火+回火（QT）两种。供货状态为：第一次正火 900°C 空

冷，第二次正火 790℃空冷。双正火细化了晶粒。回火 550℃～580℃后急冷，经双正火和回火后的组织是回火马氏体与贝氏体；在回火处理中重新形成少量的奥氏体，这种奥氏体由于碳化物的溶入而导致含碳量增高，使 M_s 和 M_f 点向更低的温度方向移动，表现为低温时极为稳定，且不容易发生相变。所以，9Ni钢的良好低温韧性除化学成分之外，在很大程度上依赖于恰当的热处理规范的选择其组织具有良好的低温韧性和断裂韧度，在低温下-196℃组织稳定，不发生影响力学性能与物理性能的相变，可焊性良好，在LNG和液氮等领域广泛使用。

关于这种钢材，1956年初列入ASTM标准，1977年列入JIS标准。在此期间，美、法、日本及阿联酋等国先后用该钢种建造了不少储罐和容器。1982年后，9Ni钢已经成为低温储罐主材，逐渐取代了Ni-Cr不锈钢，早在1997年时世界上已建的最大9Ni钢储罐容积就达到140000m³。由此可见，9Ni钢已是国际上广泛使用的钢种，其焊接性能良好，焊接工艺已臻成熟。

近年来，天然气作为高热值、无硫份的清洁能源正在受到人们的欢迎，使用量逐年增加。因此，相应的液化天然气(LNG)贮罐在世界各地也被大量地制造。作为LNG主要成份的甲烷，沸点是-161.5℃，能够在该超低温下安全使用的材料有9Ni钢、铝合金、奥氏体不锈钢及镍合金等。上述几种使用材料中，9Ni钢以其强度高、易于加工和焊接性优良等优势，被广泛用LNG储罐设备中。1952年，第一台9%Ni钢储在美国投入使用。1969年，日本在根岸采用手工电弧焊法建造了国内第一台9Ni钢制LNG储罐，随后又将自动焊用于9Ni钢LNG储罐上。到目前为止，9Ni钢在LNG设备中的应用已有40多年的历史。

第二节 9Ni 钢的化学成份和机械性能

1、9Ni 钢的化学成份

钢号	化学成分									
	C%<0.13	Mn%<0.90	Si%0.15~0.40	S%<0.035	P%<0.035	N%<0.005	Al%<0.021	Cu%<0.02	Cr%<0.03	Ni%8.50~9.50
9Ni	0.05	0.48	0.27	0.003	0.010	0.005	0.021	0.02	0.03	8.86
	Nb%<0.02	Mo%<0.12	V%<0.03	Sn%<0.005						
	0.00	0.06	0.01	0.00						

2、各合金元素的作用

元素种类	影响效果
Cr	稳定化元素，含量在 11%以上时，会生成稳定钝化膜，有助于抵抗高温氧化、酸腐蚀
Ni	稳定化元素，减轻脆性并改善机械性能，增强耐酸能力
C	碳化物析出会造成孔蚀，一般控制<0.08%
Mo	强化钝化膜，增抗孔蚀及晶间腐蚀能力
Cu	有利于抵抗酸的能力，添加超过 2%易生成脆性相
Mn	奥氏体相稳定化元素，提高耐磨性及氮的固容量
N	提高强度，耐腐蚀性能
Si	有助于高温耐氧化及耐酸蚀性能

从9Ni钢化学成分中可以看出Ni含量达到了8.86%，超过了一般不锈钢材料，Ni元素的主要作用对于防止金属材料的低温脆性起到了关键作用。

3、母材的机械性能

钢号	屈服强度 σ_s (MPa)	抗拉强度 σ_b (MPa)	伸长率 δ (%)
9Ni	≥ 515	690~825	≥ 20.0

第三章 9Ni 钢焊接工艺

第一节 9Ni 钢焊接性能

1、焊接过程可能产生的问题

在焊接冶金反应和热循环的作用下，金相组织和成份的改变，脆性相的产生，使9Ni钢的低温性能下降，冷、热裂纹倾向增大。此外，还存在由于母材磁化而引起磁偏吹问题，下面就各种问题进行理论计算分析。

1.1 冷裂纹

钢材的焊接冷裂纹敏感性一般与母材和焊缝金属的化学成分有关，为了说明冷裂

纹敏感性与钢材化学成分的关系，通常用碳当量来表示。

推荐者	碳当量公式（100%）	适用范围
国际焊接学会	$CE=C + Mn/6 + (Ni+Cu)/15 + (Cr+Mo+V)/5$	中等强度的非调质低合金钢（400~700MPa），C%>0.18%
日本焊接学会	$Ceq=C+ Mn/6+Si/14+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14$	强度级别较高的低合金高强钢（500~1000MPa），调质非调质均可C%>0.18%
日本的伊藤等	$Pcm=C+Si/30+(Mn+Cu+Cr)/20+Ni/60+Mo/15+V/10+5B$	强度级别为400~900MPa低合金高强钢C%≤0.17%
日本的铃木等	$CEN=C+A(C)[Si/24+Mn/16+Cu/15+Ni/20+(Mo+Cr+V+Nb)/5+5B]$ 式中：A(C)–碳的适应系数 $A(C) = 0.75+0.25tgh[20w(C)-0.12]$	含碳量0.034%~0.254%的低合金高强钢
日本的伊藤等	$Pcm=C+Si/30+(Mn+Cu+Cr)/20+Ni/60+Mo/5+V/10+23B$ 式中：B*=B(总量)–10.8/14.1{N(总量)–Ti/3.4} N≤Ti/3.4时，B*=B(总量)	低碳微合金化（Mo, V, Ti, Nb, B等）的控轧钢和细晶粒钢

9Ni钢w(C)为0.05%，因此采用CEN碳当量计算公式，含碳量允许范围较宽w(C)=0.034~0.254%，具体如下：

$$CEN=w(C)+A(C)\left\{\frac{1}{24}w(Si)+\frac{1}{16}w(Mn)+\frac{1}{15}w(Cu)+\frac{1}{20}w(Ni)+\frac{1}{5}w(Cr+Mo+V+Nb)+5w(B)\right\}$$

式中A(C)——碳的适用系数

$A(C)=0.75+0.25\tanh[20(W(C)-0.12)]$ 式中tanh双曲线正切函数。

$$A(C)=0.75+0.25*\tanh(20*(0.05-0.12))=0.56$$

$$CEN=0.05+0.56*(0.27/24+0.48/16+0.02/15+8.86/20+0.1/5)$$

$$CEN=0.333$$

根据 JGJ81-2002 规定：钢材碳当量小于 0.38，焊接难度一般；在 0.38~0.45 范围内，焊接程度较难。9Ni 钢的碳当量 0.333，可焊接性比较好。

冷裂纹产生的原因有三方面：

1. 熔合区出现硬化层。9Ni钢本身含碳量不变(≤ 0.10)，焊接时本不会产生硬化组织，但如果选用含碳量较高的焊材也会因熔合、扩散使熔合区含碳量增高而产生

硬化层。

2. 氢含量过高。氢在硬化层中积聚是由于焊缝坡口附近不洁(有水、油及有机物)，及焊条扩散氢含量高所致。

3. 焊接接头应力包括组织应力、热应力和拘束应力。

1.2 热裂纹

热裂纹的产生与焊缝金属结晶过程中的低熔点杂质偏析的数量及分布有关。液体金属结晶过程越长偏析越严重，偏析产生的低熔点杂质分布在晶界上，尤其在纯奥氏体组织中，杂质在晶界上的分布是连续的。

焊接热裂纹具有高温沿晶断裂性质，发生高温沿晶断裂的条件是，在高温阶段晶间延性或塑性变形能力 δ_{\min} 不足以承受凝固过程或高温时冷却过程积累的应变 ε ，即 $\varepsilon \geq \delta_{\min}$ 。宏观可见的焊接热裂纹，其断口均有较明显的氧化色彩，这可作为初步判断是否属于热裂纹的依据。

对于低温钢的热裂敏感系数HCS公式：

$$HCS = \frac{W(C) * [W(S) + W(P) + W(Si)/25 + W(Ni)/100]}{3W(Mn) + W(Cr) + W(Mo) + W(V)} * 10^3$$

当 $HCS < 4$ 时可以防止热裂纹。

$$HCS = [0.05 \times (0.003 + 0.01 + 0.27/25 + 8.86/100)] \times 1000 / (3 \times 0.48 + 0.03 + 0.06 + 0.01)$$

$HCS = 3.65 < 4$ 可以防止热裂纹。

1.3 低温韧性下降

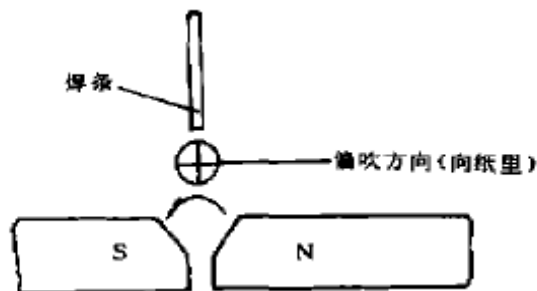
低温韧性降低的原因有两方面；

1. 焊接材料的影响 焊缝金属及熔合区的化学成分与焊材有关，如果焊材含碳量高，或者 [Ni]、[Cr] 当量搭配以及焊材与母材熔合后的 [Ni]、[Cr] 当量搭配落在不锈钢组织图中含马氏体的区域内，都会引起低温韧性下降。

2. 焊接线能量和层间温度会改变焊接热循环的峰值、温度，从而影响热影响区的金相组织。如峰值温度过高，会使逆转奥氏体减少并产生粗大的贝氏体，从而使低温韧性下降。

1.4 磁偏吹

9Ni钢在加工运输过程中可能被磁化，当用直流焊机焊接时会进一步磁化，导致电弧磁偏吹(如下图)。钢板为正极，焊条为负极，坡口中漏磁通方向由N极至S极，电弧将向图中背后方向偏吹乃至拉断，使焊接无法正常进行。



2、 9Ni 钢焊接问题针对措施

2.1 冷热裂纹倾向的预防

冷裂纹产生的原因是应力、淬硬组织和焊缝金属扩散氢含量；热裂纹的产生则与应力、杂质和化学成分有关。通过对不锈钢焊条如TH17/15TTW 与 ENiCrMo-6镍合金焊条焊接9Ni钢后的裂纹倾向进行比较，发现ENiCrMo-6镍合金焊条具有如下特点：

1. ENiCrMo-6焊条中的镍合金与9Ni钢在室温和高温下的线胀系数基本相近，从而避免因不均匀的热胀冷缩造成的热应力。

2. ENiCrMo-6镍合金焊条中含Ni量高达55% ~ 66%，含碳量与9Ni钢相同，均为低碳型，考虑母材对焊缝金属的稀释作用，仍有足够高的奥氏体组织避免熔合线出现硬脆马氏体带。

3. ENiCrMo-6镍合金焊条具有低碳性(含碳量保持在0.05%左右，在Fe-C状态图中处于很小的“脆性温度区间”以及高纯度(含S ≤ 0.03%，P ≤ 0.02%)，低含氢量等特性。

4. 采用Ni基、Fe-Ni基焊条焊接9Ni钢，所得的组织为奥氏体组织。强度略低，焊接时对热裂纹敏感性高，熔深浅，控制不当易产生未焊透及熔合不良等缺陷。要消除以上裂纹，最有效的方法是减少有害杂质、采用正确的收弧技术并配合打磨处理。

5. 9Ni钢本身与同等强度水平的其它低合金钢相比有较好的抗裂纹的能力，在低氢情况下一般不会产生冷裂纹。但采用低镍高锰型奥氏体焊条时，因母材的稀释作

用，在熔合区会出现高硬度的马氏体带，对氢脆敏感。防止冷裂纹的措施是在施焊中严格执行焊接工艺规程，特别是焊条烘干、焊接环境温度、焊接规范等。采用 Ni 基合金材料焊接，使熔合区基本上不出现高硬度马氏体带。有利于避免冷裂纹的产生。

由此可见，ENiCrMo-6 镍合金焊条的使用可提供降低 9Ni 钢焊缝冷、热裂纹倾向的基本条件。同时说明，在严格控制扩散氢含量的条件下，选用 ENiCrMo-6 镍合金焊条可基本避免 9Ni 钢的焊接冷、热裂纹倾向。

2.2 焊接接头低温韧性的保证

焊接接头包括焊缝、熔合区和热影响区，焊接接头的低温韧性问题是出现在焊缝金属、熔合区和粗晶区中，焊缝金属的低温韧性主要与采用的焊接材料类型有关。用与 9Ni 钢成份相同的焊接材料焊接 9Ni 钢时，焊缝金属的低温韧性很差，这主要是焊缝金属中的含氧量太高，有时可达 $6 \times 10^{-4} \%$ ，因此焊接 9Ni 钢的材料通常选用 Ni 基、Fe-Ni 基焊条。

采用 ENiCrMo-6 镍合金焊条焊接 9Ni 钢时，每个区域的化学成分和金相组织各不相同。其中焊缝金属为奥氏体组织，具有良好的低温韧性；在熔合区由于焊条的含碳量与 9Ni 钢相同，含 Ni 量高达 55% 以上，可有效阻止碳迁移，避免熔合区产生脆组织，从而保证熔合区低温韧性；热影响区，在 1100°C 以上峰值温度的热循环作用下，会产生粗大的马氏体和贝氏体组织，逆转奥氏体减少，使低温韧性下降。因此，尽量控制线能量并采用多道焊，以减少高温停留时间。另有资料表明，9Ni 钢的低温脆性转变温度 V_{TrS} 随焊接接头 (540°C) 的冷却速度 WC 的增大而下降，见图 2。

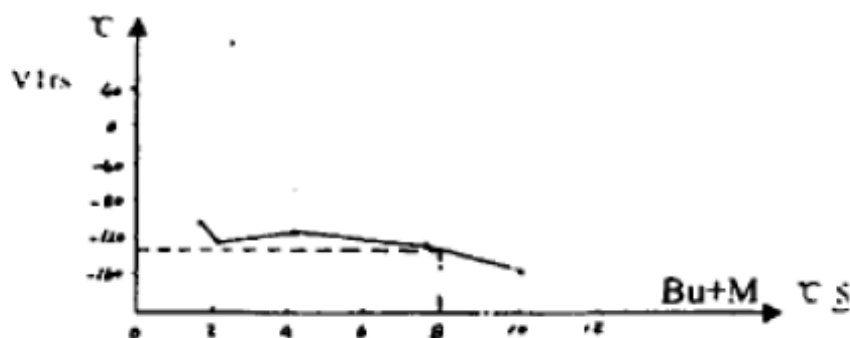


图 2 近缝区 V_{Trs} 与 WC 的关系

由此可见，采用 ENiCrMo-6 镍合金焊条焊接 9Ni 钢时，焊接接头的低温韧性主要取决于焊接热输入和焊缝金属结晶过程的冷却速度。

2.3 克服磁偏吹的途径

(1) 母材和焊接材料：母材运至现场时的剩磁要求，必要时进行消磁处理，同时选择能防止电弧磁偏吹的焊接材料。

(2) 9Ni钢属强磁材料，直流焊接时会产生磁偏吹现象，在焊接时应尽量使用交流焊接（焊接设备：采用交流方波焊接电源）或用磁铁进行退磁。

(3) 打磨方式：由于碳弧气刨采用直流电焊机，气刨电流通常在500A以上，这样气刨、直流焊机和罐壁之间构成直流外加强磁场，当碳刨结束，罐壁中容易产生较强的剩磁，从而导致焊接电弧磁偏吹。因此尽量用砂轮打磨。

第二节 焊接工艺评定

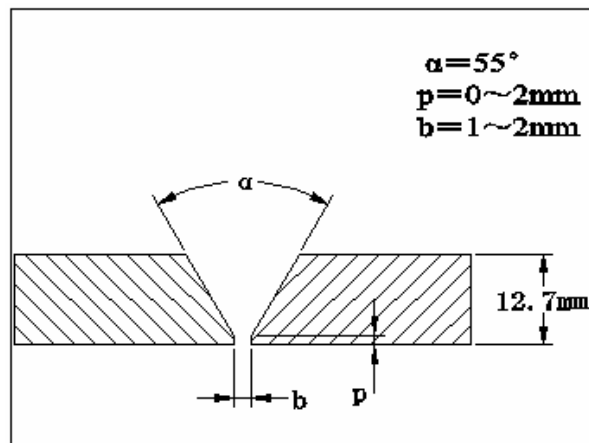
1、焊接工艺准备

通过组织对国内施工现场的考查，以及工程施工所必须的焊接工艺，界定了采用手工电弧焊和埋弧自动焊的焊接工艺，这主要是由于9Ni钢储罐由于直径达到80米，因此环缝基本采用埋弧自动焊，可以提高效率。而纵缝由于只有3米每层通常采用手工电弧焊的施工工艺。

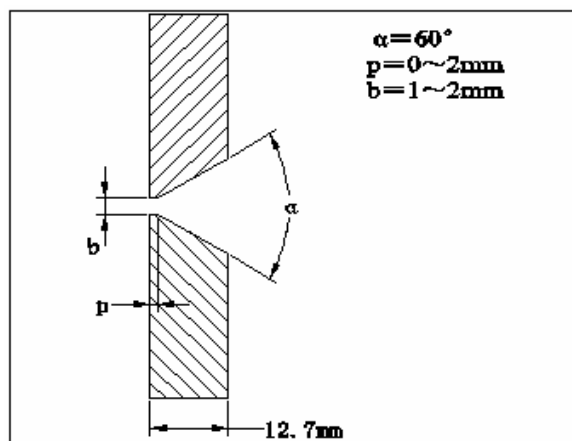
2、手工电弧焊焊接工艺评定

按照焊接要求采用与实际相似的试件、相应的位置进行工艺评定，焊接工艺评定按照ASME标准执行，焊接工艺评定9Ni钢板厚12.7 mm SMAW板对接立焊和横焊。

2.1 设计坡口



立焊图 1



横焊图 2

2.2 坡口制备:

可用气割下料和制备坡口，气割的坡口应进行打磨。因 Ni 基材料膨胀系数较大，选用较小坡口型式立焊坡口角度 55° ，横焊坡口角度 60° 。即减小坡口面积，使变形减小，还能提高焊接效益、减少 Ni 基材料的消耗使成本降低。

2.3 焊前清理:

焊前将坡口表面及附近 20 ~ 30mm 范围的铁锈、油污、毛刺等杂质用磨光机、锉刀清理干净，露出金属光泽。

2.4 焊接方法及焊接设备的选择:

焊接方法选用焊条电弧焊。

焊机选用美国 Miner 公司生产的 Dynasty-300SD. DX And LX, 该焊机特点如下:

(1) 自动转接 (Auto-Link) 功能可自动在 230V 或 460 伏单相或三相交流电源之间进行转接, 而不必移去外壳重新连接电源。

(2) 可编程的 HF 启动参数可使操作者根据工艺或应用条件来分别设置启动条件。

(3) 对所有的输入电压均表现出优良的氩弧和手弧焊接性能, 即使像 E6010 这样的难焊焊条亦是如此。

(4) 基于逆变技术的交/直流电源具有最先进的操作界面, 可使用户在紧凑的机器中进行额外的设置, 比传统的安钮开关实现更精确的输出参数控制。

(5) 高频电弧启动可实现非接触电弧启动, 消除对钨极或材料的氧化。

(6) 提升起弧 (Lift-Arc™) 功能可以不需使用高频实现氩弧焊电弧启动。

型号	额定输出 (60%暂载率)	焊接电流	最大空载电压
Maxstar 300	250A (30 VDC, 单相)	65-300	95 VDC
	在额定输出下的输入电流 (50Hz) 400V 通渠道 KVA KW	外形尺寸	净重
	16.9 11.7 8.0	H: 432mm W: 318mm D: 610mm	无辅助电源 39kg 带辅助电源 45kg

此焊机可交流、直流转换。考虑到直流在焊接 9Ni 钢时易发生磁偏吹, 因此选用交流焊接。

2.5 焊接材料的选择:

根据焊接结构的材料性能和化学成份、工作条件、使用性能以及生产条件和设备等因素, 选择 ENiCrMo-6 焊条, 焊条直径 $\Phi 3.2\text{mm}$, 焊前进行烘干 $300^{\circ}\text{C} \sim 350^{\circ}\text{C}$ 一小时, 备保温桶随用随取, 烘好的焊条超过 4 小时不用, 应重新进行烘干。焊条烘干不超过 3 次。焊材的化学成份见表 3, 焊材的机械性能见表 4。

表 3 焊材的化学成份

型号	化 学 成 份												
	C	Mn	Fe	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Nb +Ta	Mo	W	其它元素总量
E NiCrMo-6	0.10	2.0 ~4.0	10.0	0.03	0.02	1.0	0.50	≥ 56.0	12.0 ~17.0	0.5 ~2.0	5.0 ~9.0	1.0 ~2.0	0.50

表 4 焊材机械性能

型号	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ /(%)
E NiCrMo-6	≥ 620	≥ 35

2.6 焊接环境:

焊接时温度: 应 $> 0^{\circ}\text{C}$;

风速: < 8 米/秒;

相对湿度: $< 90\%$ 。

2.7 焊接工艺参数:

立焊单面焊双面成型焊接层次见下图 3, 同时立焊焊接工艺参数见表 4; 横焊双面焊焊接层次见下图 5, 焊接工艺参数见表 6。

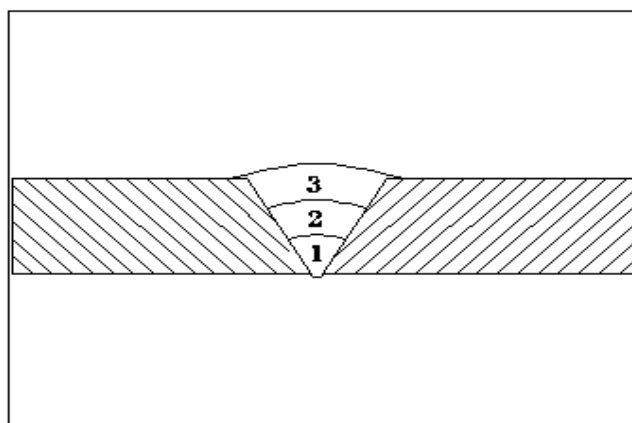


图 3 立焊焊接层次

表 4 立焊焊接工艺参数

焊接方法	焊材型号	规格 mm	焊层	焊接电流 A	电弧电压 V	焊接速度 $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$	焊接热输入 $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$	层间温度 $^{\circ}\text{C}$
SMAW	E NiCrMo-6	3.2	1	84~85	20.1~23.9	5.3~5.8	20.4~23.0	/
			2	99~101	20.3~23.4	5.5~6.9	19.9~26.0	45
			3	90~101	20.1~22.7	8.3~9.0	14.4~16.2	40

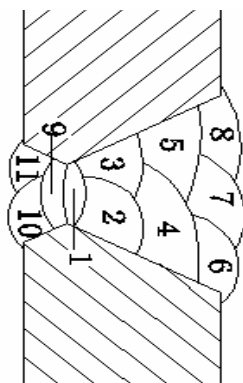


图 5 横焊焊接层次

表 6 横焊焊接工艺参数

焊道	焊接电流 A	电弧电压 V	焊接速度 $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$	焊接热输入 $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$	层间温度 $^{\circ}\text{C}$
1	104~116	20.3~24.5	9.3~13.5	12.0~16.6	/
2	115~116	21.0~24.4	19.9~25.1	6.7~8.2	35
3	115~116	20.3~24.2	18.0~20.6	8.2~9.4	/
4	105~116	20.2~24.1	17.1~22.1	7.1~9.8	45
5	105~116	20.3~23.4	13.9~15.4	9.6~11.5	/
6	110~116	20.5~23.8	25.0~30.8	5.0~6.6	39
7	109~111	20.9~23.8	20.8~23.9	6.6~7.6	/
8	109~111	20.3~23.4	32.9~35.0	4.4~4.6	/
9	114~116	20.3~23.8	21.5~24.6	6.5~7.7	35
10	110~111	20.9~23.4	41.5~43.5	3.5~3.7	45
11	110~111	20.4~23.0	30.7~35.7	4.3~4.9	/

2.8 操作要点:

2.8.1 焊条电弧焊时直径不宜超过 $\Phi 4\text{mm}$, 由于用 Ni 基焊接材料焊接的焊缝金属的熔点比 9Ni 钢低 $100 \sim 150^\circ\text{C}$ 左右, 易造成未溶合等缺陷, 因此对焊工必须严格培训。操作过程中不可任意乱打弧, 更不要在坡口外边打弧, 在钢板表面上避免打弧擦伤。

2.8.2 在焊条结尾收弧时一定要填满弧坑, 在收弧处多停留一会, 避免产生弧坑裂纹, 如出现裂纹时, 应立即进行打磨处理。在单面焊双面成型时, 不宜采用断弧、摆弧、挑弧等方式, 控制熔池温度的运条方法, 因为这种方法会影响气 - 渣保护效果, 也会影响正常的焊接冶金反应, 再者断弧因药皮套筒过长, 焊芯过短, 不易引弧, 需采用连弧的运条方法, 尽量不摆动。

2.8.3 9Ni 钢的低温韧性是依靠控制热处理温度和组织而获得的。凡热处理和焊接的热循环使组织发生不利的变化均会使 9Ni 钢热影响区韧性下降。为避免金属及近缝区形成粗大组织而使焊缝及热影响区的韧性恶化。双面焊时焊条尽量不摆动, 采用窄焊道、多层多道焊。在打底焊时用穿透法焊接, 把弧坑尽量留在背面以便清根时对裂纹等缺陷能被消除掉, 清根后的背面要有合理地坡口形状, 避免出现深而窄的坡口, 收弧时应尽量减少熔池尺寸, 把弧坑引向坡口边缘或引回焊道外缘并适当打磨处理。焊接电流不宜过大, 宜用快速多道焊以减轻焊道过热, 并通过多层焊的重热作用细化晶粒。多道焊时要控制层间温度, 应采用小热输入施焊, 焊条电弧焊热输入应控制在 35KJ/cm 以下, 多层焊层间温度应小于 100°C , 避免接头过热。

2.9 焊接检验及结果

2.9.1 焊缝外观成形表面光滑, 宽窄一致, 未存在未熔合和表面气孔等缺陷, 检验标准 EN970, 采用目测、焊接检验尺。

检查项目	标准规定值	实测值		
正面焊缝高度	$\leq 1 + 0.1b$ 且 最大为 3	1.0	2.0	1.7
背面焊缝高度		0.7	2.3	1.7
裂纹长度	不允许	无		
咬边	不允许	无		

夹渣	不允许	无
未焊透	不允许	无
气孔	不允许	无

2.9.2 焊缝进行了 X 射线探伤 检验标准 EN1435。

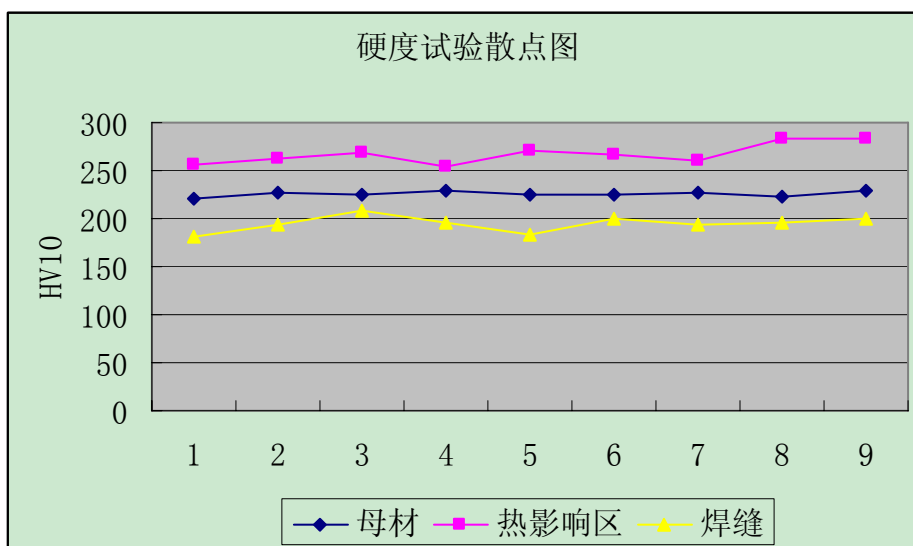
共进行 X 射线检验拍片 6 张，在两张片上各有 1 个允许气孔，6 张片全部 I 级，射线检验结论合格。

渗透探伤 检验标准 EN571，经对焊缝区域进行渗透检验，未发现不合格缺陷，评定为 I 级，渗透检验结论合格。

硬度试验 检验标准 EN1043-1，检验结果：合格。

分别对母材、热影响区、焊缝进行硬度试验，以测定焊接各区域的淬硬倾向来评定钢材的冷裂纹敏感性，试验按照 EN1043-1《金属材料焊接的破坏试验. 硬度试验》的规定进行。

位置	硬度 HV10	平均硬度 HV
母材	221, 228, 224, 230, 226, 225, 227, 222, 230	226
热影响区	256, 262, 268, 254, 270, 266, 260, 283, 284	267
焊缝	182, 194, 209, 195, 183, 201, 193, 196, 200	195



由图表可见，在室温下焊接时，母材、热影响区、焊缝的维氏硬度最高值分别为 230、284 和 209，平均值分别为 226、267 和 195。最高硬度值(参照同等强度的 HW56)均未超过 HVmax420，说明 9Ni 钢的淬硬倾向不大，焊接性较好。

2.9.3 焊缝的缩截面拉伸试验、焊缝全焊缝熔敷金属拉伸试验以及对焊缝弯曲试

验、冲击试验，见下表。

全焊缝熔敷金属拉伸试验

缩 截 面 拉 伸 试 验						
					试验标准：EN 895	
试样编号	试样宽度 (mm)	试样厚度 (mm)	横截面积 (mm²)	断裂载荷 (KN)	抗拉强度 (MPa)	断裂部位 和特征
HYHP041-7	19	12.4	235.6	/	764.0	母材
HYHP041-8	19	12.3	12.3	/	787.3	焊缝
全焊缝熔敷金属拉伸试验						
					试验标准：EN 10002	
试样编号	试样宽度 (mm)	试样厚度 (mm)	试验截面 (mm)	断裂载荷 (KN)	抗拉强度 (MPa)	断裂部位 和特征
HYHP041-19	19.5	12.7	Φ 5.1	/	685	焊缝
HYHP041-20	19.5	12.7	Φ 5.0	/	713	焊缝
弯 曲 试 验						
					试验标准：EN 910	
试样编号	试样类型	试样厚度 (mm)	弯曲直径 (mm)	弯曲角度 (°)	试验结果	
HYHP041-11	纵向面弯	12	40	>120	合格	
HYHP041-12	纵向背弯	12	40	>120	合格	
冲 击 试 验						
					试验标准：EN 10045-1	
试样编号	试样尺寸	缺口类型	缺口位置	试验温度 (℃)	冲击吸收功 (J)	纤维 断面率
2#-1	10×10×55	v	焊缝区	-196	57	100%
2#-2	10×10×55	v	焊缝区	-196	62	100%
2#-3	10×10×55	v	焊缝区	-196	62	100%
3#-1	10×10×55	v	熔合线区	-196	89	100%
3#-2	10×10×55	v	熔合线区	-196	124	100%
3#-3	10×10×55	v	熔合线区	-196	101	100%
4#-1	10×10×55	v	熔合线+2mm	-196	126	100%
4#-2	10×10×55	v	熔合线+2mm	-196	149	100%
4#-3	10×10×55	v	熔合线+2mm	-196	175	100%
5#-1	10×10×55	v	熔合线+5mm	-196	187	100%
5#-2	10×10×55	v	熔合线+5mm	-196	180	100%
5#-3	10×10×55	v	熔合线+5mm	-196	160	100%

2.9.4 宏观金相检测

通过宏观检测，检测结果焊缝金属与热影响区完全熔合，没有裂纹等不允许缺陷，检测结果合格。

3、埋弧自动焊焊接工艺评定

3.1 焊接设备及其焊接材料的选择

埋弧自动焊是熔敷速率很高的一种焊接方法，由于焊透深度小，必须增大埋弧焊时的焊接接头的坡口厚度。为减少焊接缺陷，必须采用细的焊丝（ $\phi 3.2\text{mm}$ 以下），以牺牲焊接效率来保证焊接质量。本方案采用美国 Miller 交流方波电源的埋弧自动横焊机，焊丝采用含镍量 60% 以上的 ERNiCrMo-3，焊丝直径为 $\phi 2.4$ 。

3.2 美国 Miller 交流方波电源的埋弧自动横焊机性能介绍

全套设备主要由焊接行走机架、埋弧自动焊接系统、电源台架及配电柜、焊剂托持循环回收系统以及电气控制系统几部分组成。

焊机技术参数：

罐体直径：适合于直径 8m 以上的储罐；

适用材质：低碳钢、高强钢、9Ni 钢；

适用板厚：10~50mm；

适用焊丝： $\Phi 1.6\text{mm}$ 、 $\Phi 2.0\text{mm}$ 、 $\Phi 2.4\text{mm}$ 、 $\Phi 3.2\text{mm}$ 、 $\Phi 4.0\text{mm}$ 各种专用焊丝；

焊缝成型要求：焊缝背面不需要碳弧气刨清根；

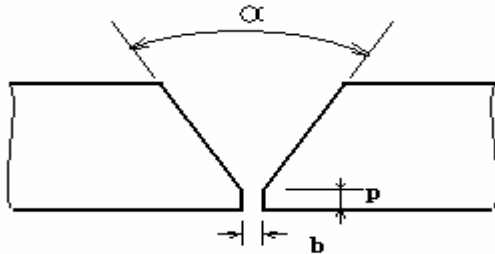
机架行走速度：0~2650mm/min 无级可调

焊枪上下、前后可调节范围： $\pm 15^\circ$

- (1) 焊接行走架采用方钢、钢管制成的焊接钢结构，主要由顶盖总成、伸缩体总成、底板总成、升降调整机构、液压顶升机构及动力总成五部分组成。
- (2) 埋弧自动焊系统由 RAD400 埋弧焊机头经焊接控制电缆与主控制箱和 MILLER SUMMIT ARC1250 电源连接，实现焊接电流、电压的远程控制。
- (3) 电源台架采用微型集装箱式结构，内部配备了给行走机架与 SUMMIT ARC1250 焊接电源供电的配电柜。
- (4) 焊剂托持及循环回收系统，焊剂通过拖轮皮带支持，采用大功率回收机将托带上的剩余焊剂进行回收，以实现循环利用。

3.3 焊前准备和焊接工艺要点

(1) 焊前准备, 可以用气割下料和制备坡口, 气割的坡口边缘应进行打磨至露出金属光泽。



厚度: 18mm

间隙: 2mm

钝边: 2~3mm

坡口角度: 80°

- (2) 焊剂必须烘干以降低扩散氢水平, 防止产生冷裂纹。
- (3) 焊接 9Ni 钢时, 焊接线能量应控制在 45KJ/cm 以下, 一般常用 7~35KJ/cm。
- (4) 多层焊时层间温度应控制在 100℃ 以下。
- (5) 打底焊时用穿透法焊接, 把弧坑尽可能留在背面, 以便清根时裂纹等缺陷被消除掉。
- (6) 清根后的背面要有合理的坡口形状, 避免出现深而窄的坡口。
- (7) 在收弧时应尽量减小溶池尺寸, 把弧坑引向坡口边缘, 并进行适当的打磨处理。

3.4 焊接规范

层数	焊接方法	焊接材料	规格 (mm)	极性	焊接电流 (A)	焊接电压 (V)	焊接速度 (cm/min)
1	SAW	ERNiCrMo-3	2.4	交流	360~380	26~28	43
2	SAW	ERNiCrMo-3	2.4	交流	360~380	26~28	58
3	SAW	ERNiCrMo-3	2.4	交流	360~380	26~28	66
4	SAW	ERNiCrMo-3	2.4	交流	360~380	26~28	66
5	SAW	ERNiCrMo-3	2.4	交流	360~380	26~28	66
6	SAW	ERNiCrMo-3	2.4	交流	360~380	26~28	66
7	SAW	ERNiCrMo-3	2.4	交流	360~380	26~28	72
8	SAW	ERNiCrMo-3	2.4	交流	360~400	26~28	72

3.5 焊接检验及结果

3.5.1 焊缝外观成形光滑, 宽窄一致, 未存在未熔合和表面气孔等缺陷, 检验标准

EN970, 采用目测、焊接检验尺。

检查项目	标准规定值	实测值		
正面焊缝高度	$\leq 1 + 0.1b$ 且 最大为 3	1.5	1.5	1.5
背面焊缝高度		1	1	1
裂纹长度	不允许	无		
咬边	不允许	无		
夹渣	不允许	无		
未焊透	不允许	无		
气孔	不允许	无		

3.5.2 焊缝进行了 X 射线探伤 检验标准 EN1435。

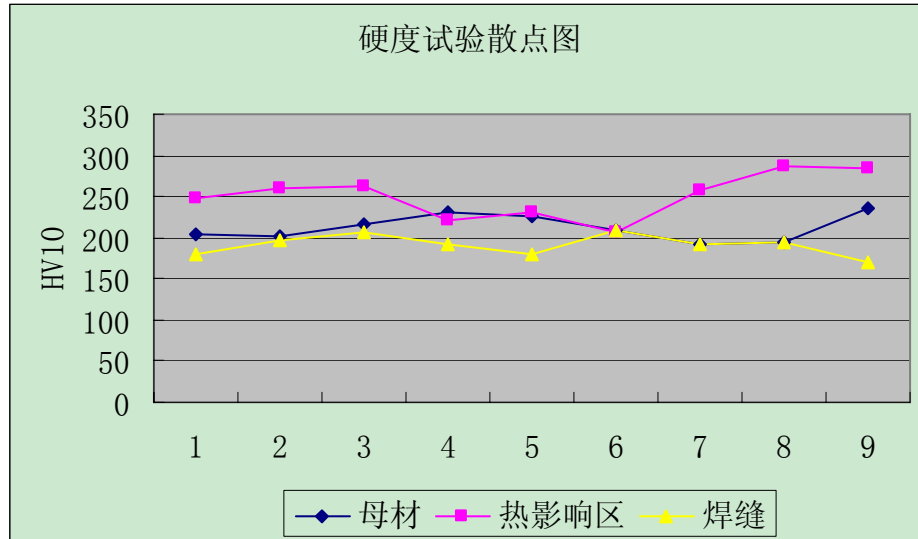
共进行 X 射线检验拍片 5 张, 片上各有少量允许气孔, 5 张片全部 I 级, 射线检验结论合格。

渗透探伤 检验标准 EN571, 经对焊缝区域进行渗透检验, 未发现不合格缺陷, 评定为 I 级, 渗透检验结论合格。

硬度试验 检验标准 EN1043-1, 检验结果: 合格。

分别对母材、热影响区、焊缝进行硬度试验, 以测定焊接各区域的淬硬倾向来评定钢材的冷裂纹敏感性, 试验按照 EN1043-1《金属材料焊接的破坏试验. 硬度试验》的规定进行, 以下为本次试验的测量数据。

位置	硬度 HV10	平均硬度 HV
母材	203, 201, 217, 231, 227, 208, 191, 194, 236	212
热影响区	249, 259, 262, 221, 230, 207, 258, 287, 284	251
焊缝	181, 197, 207, 193, 181, 209, 191, 195, 169	191



由图表可见，在室温下焊接时，母材、热影响区、焊缝的维氏硬度最高值分别为 236、287 和 209，平均值分别为 212、251 和 191。最高硬度值(参照同等强度的 HW56)均未超过 $HV_{max}420$ ，说明 9Ni 钢的淬硬倾向不大，埋弧焊焊接性较好。

3.5.3 焊缝的缩截面拉伸试验、焊缝全焊缝熔敷金属拉伸试验以及对焊缝弯曲试验、冲击试验，见下表。

缩 截 面 拉 伸 试 验						
					试验标准：	EN 895
试样编号	试样宽度 (mm)	试样厚度 (mm)	横截面积 (mm²)	断裂载荷 (KN)	抗拉强度 (MPa)	断裂部位 和特征
HYHP041-7	19	18	335	/	659.9	焊缝
HYHP041-8	19	18	236	/	690.8	焊缝
全焊缝熔敷金属拉伸试验						
					试验标准：	EN 10002
试样编号	试样宽度 (mm)	试样厚度 (mm)	试验截面 (mm)	断裂载荷 (KN)	抗拉强度 (MPa)	断裂部位 和特征
HYHP041-19	19.5	18	Φ 7	/	636	焊缝
HYHP041-20	19.5	18	Φ 7	/	588.6	焊缝
弯 曲 试 验						
					试验标准：	EN 910
试样编号	试样类型	试样厚度 (mm)	弯曲直径 (mm)	弯曲角度 (°)	试验结果	
HYHP041-11	纵向面弯	18	40	>120	合格	
HYHP041-12	纵向背弯	18	40	>120	合格	
冲 击 试 验						
					试验标准：	EN 10045-1
试样编号	试样尺寸	缺口类型	缺口位置	试验温度 (℃)	冲击吸收功 (J)	纤维 断面率
6#-1	10×10×55	v	焊缝区	-196	89	100%
6#-2	10×10×55	v	焊缝区	-196	87	100%
6#-3	10×10×55	v	焊缝区	-196	84	100%
7#-1	10×10×55	v	熔合线区	-196	181	100%
7#-2	10×10×55	v	熔合线区	-196	198	100%
7#-3	10×10×55	v	熔合线区	-196	189	100%
8#-1	10×10×55	v	熔合线+2mm	-196	204	100%
8#-2	10×10×55	v	熔合线+2mm	-196	195	100%
8#-3	10×10×55	v	熔合线+2mm	-196	206	100%
9#-1	10×10×55	v	熔合线+5mm	-196	179	100%
9#-2	10×10×55	v	熔合线+5mm	-196	201	100%
9#-3	10×10×55	v	熔合线+5mm	-196	191	100%

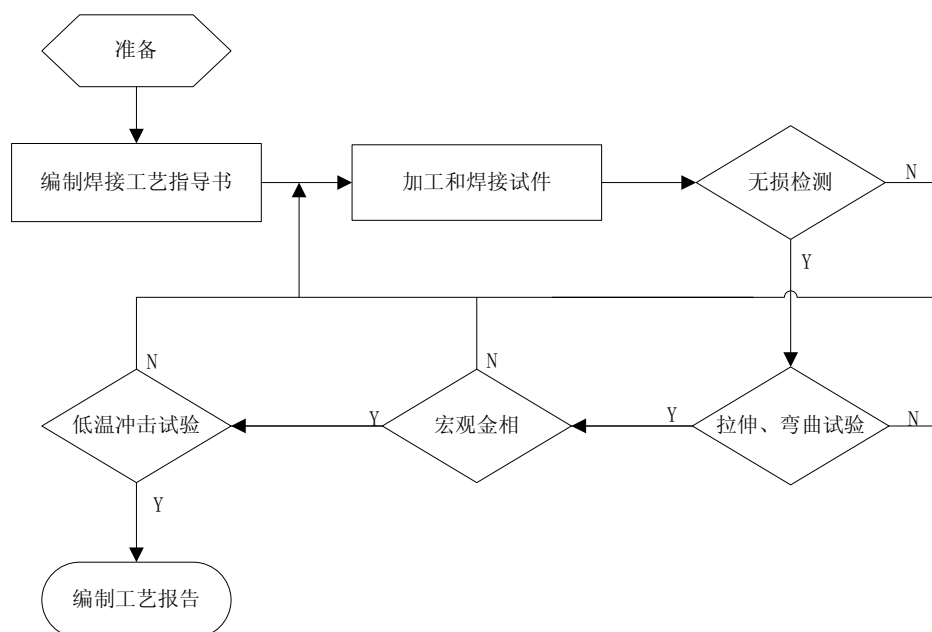
3.5.4 宏观金相检测

通过宏观检测,检测结果焊缝金属与热影响区完全熔合,没有裂纹等不允许缺陷,检测结果合格。

第三章 焊接工艺评定的相关内容

第一节 焊接工艺评定程序

为了保证工艺评定的完成，同时编制了工艺制作流程，如下图所示。



第四章 结论

通过各项试验，手工焊和埋弧自动焊的焊接工艺评定各项性能指标均符合技术要求，基本掌握了低温钢 9Ni 的手工电弧焊、埋弧自动焊的焊接技术，为今后指导生产提供了重要依据。

- 1、在焊接 9Ni 钢时，由于 9Ni 钢比较容易磁化，因此采用交流电源可以有效的解决焊接中 9Ni 钢的磁化问题。
- 2、手工焊双面焊时焊条尽量不摆动，采用窄焊道、多层多道焊。焊接电流不宜过大，宜用快速多道焊以减轻焊道过热，并通过多层焊的重热作用细化晶粒。多道焊时要控制层间温度，应采用小热输入施焊，避免接头过热。
- 3、埋弧焊焊剂必须烘干以降低扩散氢水平，防止产生冷裂纹，同时控制焊接线能量，多层焊时层间温度应控制在 100℃ 以下。

参考文献

1. 《Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature service》BS7777-1~4:1993
2. 《Destructive tests on welds in metallic materials-bend tests》BS EN910
3. 《metallic materials-Tensile testing part 1》BS EN10002-1:2001
4. 《Destructive tests on welds in metallic materials-Microscopic and microscopic examination of welds》BS EN1321:2001
5. 《Destructive tests on welds in metallic materials-Test specimen location, notch orientation and examination》BS EN875:1995
6. 《Non-destructive testing of welds radiographic testing of welded joints》BS EN1435:1997
7. 《Non-destructive examination of fusion welds visual examination》BS EN970:1997
8. 《Non-destructive testing Penetrate testing》BS EN571:1997
9. 《Destructive tests on welds in metallic materials Transverse tensile test》BS EN895:1995
10. 《Destructive tests on welds in metallic materials hardness testing》BS EN1043-1:1996
11. 《Metallic material Charpy impact test》EN10045
12. 《Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0 ° C and p165 ° C》BS EN14620-1:2006
13. 《金属材料焊接工艺评定》BS EN288-1~2
14. 《焊接工艺试验》BS EN288-3
15. 中国机械工程协会焊接学会. 《焊接手册》(一). 机械工业出版社, 2001. 7
16. 中国机械工程协会焊接学会. 《焊接手册》(二). 机械工业出版社, 2001. 7
17. 《ASME 锅炉及压力容器规范国际性规范 II 材料 A 篇 铁基材料 2001 版》
18. 《ASME 锅炉及压力容器规范国际性规范 II 材料 C 篇 焊条、焊丝及填充金属 2001 版》
19. 《ASME 锅炉及压力容器规范国际性规范 IX 焊接和钎焊评定标准 2001 版》

20. 《大型焊接低温储罐设计与建造》API STD 620-2002
21. 刘祥儒. 《9Ni钢低温储罐焊接施工经验与工艺问题探讨》. 石油工程建设, 1997 (5): 14-18
22. 梅晔. 《9Ni钢1000m³ 乙烯低温储罐焊接技术》. 化工建设工程, 2002. 24(5): 10-13
23. 宋立群等. 《9Ni钢乙烯低温储罐的焊接》. 扬子石油化工, 1997, 12(2): 19-21
24. 张文钺. 《焊接冶金原理》. 北京: 机械工业出版社, 1999.
25. 顾钰熹. 《特种工程材料焊接》. 辽宁: 辽宁科学技术出版社, 1998. 8
26. 周振丰. 《焊接冶金学》. 北京: 机械工业出版社, 1996.