

07MnNiMoDR/10Ni3MoVD钢埋弧焊 工艺试验

王玲, 王敏, 叶涛, 李发林

荆门宏图特种飞行器制造有限公司 湖北荆门 448124

摘要: 针对高强度球罐所用的07MnNiMoDR钢板和10Ni3MoVD钢锻件间的埋弧焊焊接工艺进行研究。试验内容包括焊接材料的选择、试板焊接及在不同热处理保温时间后进行力学性能试验。试验结果表明: 采用EF1焊丝和F9P6-EF1-F1焊剂, 通过制定焊接参数, 进行试板焊接, 并经过 $(575 \pm 15)^\circ\text{C}$ 热处理, 保温时间分别为2h、4h、6h后, 焊接接头的力学性能均满足标准和设计要求。

关键词: 球罐; 高强度钢; 焊接工艺评定; 埋弧焊; 消除应力热处理

Submerged arc welding process test of 07MnNiMoDR / 10Ni3MoVD steel

WANG Ling, WANG Min, YE Tao, LI Falin

Jingmen Hongtu Special Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Jingmen 448124, Hubei, China

Abstract: In this study, the submerged arc welding process between 07MnNiMoDR steel plate and 10Ni3MoVD steel forgings for high strength steel spherical tank was studied. The content of the test includes the selection of welding material, the welding of test plate, and the mechanical properties test after different heat treatment and holding time. The results show that: the test plate is welded with EF1 welding wire and F9P6-EF1-F1 welding flux by setting the welding parameters, and after heat treatment of $(575 \pm 15)^\circ\text{C}$, the holding time is 2h, 4h, 6h respectively, the mechanical properties of the welded joints meet the standard and design requirements.

Keywords: spherical tank; high strength steel; welding process evaluation; submerged arc welding; stress relief heat treatment

1 序言

随着我国化工、冶金等行业的飞速发展, 球罐需求的大型化(高压、大容积)给球罐的设计、制造、安装提出了更高的要求。07MnNiMoDR钢板屈服强度 $\geq 490\text{MPa}$, 抗拉强度为 $610 \sim 730\text{MPa}$, 在 -50°C 时的冲击吸收能量 $\geq 80\text{J}$, 可广泛用于制造贮存除液氨外的其他化工介质和压缩气体的球罐^[1]。由于球罐产品的制造对焊接要求非常高, 所以通过

焊接工艺评定试验, 掌握07MnNiMoDR钢相关的焊接材料选用、焊接方法等注意事项, 对于保证球罐产品质量和设备安全运行非常关键。

某压力容器制造厂制造6台 2000m^3 乙烯球罐, 球罐主体材料为07MnNiMoDR钢, 接管锻件采用10Ni3MoVD钢, 结构形式为三带十柱混合式。

对于07MnNiMoDR钢制球罐, 现阶段主要焊接方法为焊条电弧焊。为了提高焊接效率, 我公司决

定对于人孔与球壳板对接焊缝采用埋弧焊焊接，在提高焊接效率的同时，改善焊缝质量。

2 焊接性分析

2.1 试验用锻件试板性能

焊接工艺评定试验用10Ni3MoVD钢锻板，其供货状态为淬火+回火。在试验前对锻板材料的化学成分和力学性能进行复验，其标准值与复验值见表1和表2。

表1 10Ni3MoVD钢锻件的化学成分（质量分数）（%）

元素	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr	P	S
标准值	0.08~0.12	0.15~0.35	0.70~0.90	2.50~3.00	0.20~0.30	≤0.30	≤0.015	≤0.008
复验值	0.09	0.28	0.78	2.72	0.21	0.08	0.012	0.006

注：CE=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15(%)=0.46%。

表2 10Ni3MoVD钢锻件的力学性能

项目	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	(-50℃) KV_2 /J
标准值	600~760	≥480	≥17	≥80
复验值	690	546	26	143、156、183

2.2 试验用钢板

焊接工艺评定试验用07MnNiMoDR钢板，其供货状态为淬火+回火状态。在试验前对钢板材料的化学成分和力学性能进行复验，其标准值与复验值见表3、表4。

表3 07MnNiMoDR钢板的化学成分（质量分数）（%）

元素	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr	P	S
标准值	≤0.09	0.15~0.40	1.20~1.60	0.30~0.60	0.10~0.30	≤0.30	≤0.015	≤0.008
复验值	0.07	0.25	1.43	0.45	0.16	0.08	0.012	0.006

注：CE=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15(%)≤0.45%。

表4 07MnNiMoDR钢板的力学性能

项目	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	(-50℃) KV_2 /J	180°， $b=2a$ $d=3a$
标准值	610~730	≥490	≥17	≥60	
复验值	689	542	27	156、163、200	合格

2.3 斜Y型焊接裂纹试验

(1) 试板制备 根据GB/T 4675.1—1984《焊接性试验 斜Y型坡口焊接裂纹试验方法》要求，制备尺寸为200mm×75mm×30mm的07MnNiMoDR钢试板2副共4块。A试板1副，焊接温度为室温。B试板1副，预热温度为100℃。

(2) 焊接材料选择 采用E6215-N5M1焊条，规格为φ4.0mm。焊前对焊条进行350~400℃的烘干，保温1h。

(3) 约束焊缝焊接 约束焊缝采用双面焊接，焊接过程中避免产生角变形和未焊透。焊接电流为170A，电弧电压为24~26V，焊接速度为15cm/min。

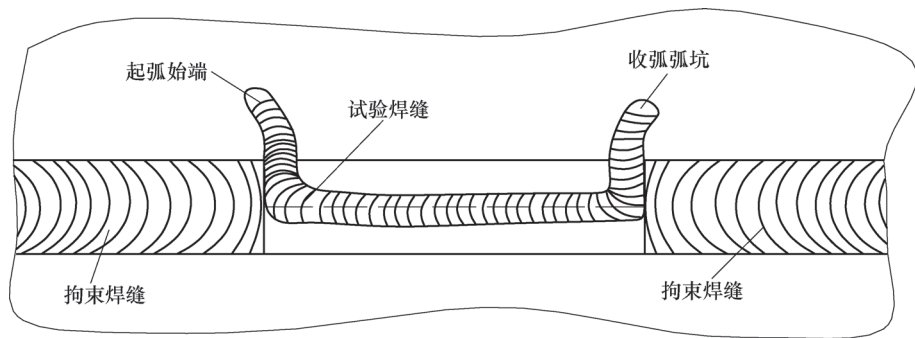
(4) 试验焊缝焊接 焊接试验焊缝前将焊接约束焊缝时产生的飞溅物清除干净，并去除水滴、油锈等。焊接时在坡口外引弧、收弧。焊后进行磁粉检测，如图1所示。

(5) 检测过程 断面裂纹检查：试件焊完经48h放置后，横向解剖进行断面裂纹检测，检测断面裂纹率的试件用锯床切割等分成5块。表面裂纹检查：清理去除飞溅、油等杂质，利用渗透检测方法，检查焊缝表面裂纹，通过适当的仪器测量裂纹长度，并计算表面裂纹率。根部裂纹检查：试样测定表面裂纹后，将拘束焊缝割除，利用氧乙炔对背面根部进行高温加热，使根部裂纹表面着色，待冷却后捶击打断焊缝，通过适当的仪器测量裂纹长度，并计算裂纹率^[2]。

(6) 断面裂纹试验结果 试样加工：试样采用机械加工，在试验焊缝区平均截取5段，对横断面进行打磨，并用3%苦味酸酒精溶液+3%浓硫酸腐蚀，采用30~50倍的显微镜来检测裂纹。试验结果见表5。

(7) 结论 07MnNiMoDR钢进行斜Y型坡口焊接冷裂纹试验，在试验温度为室温15℃时，经检验根部和表面均未产生裂纹，但断面平均裂纹率达11.1%；在试验温度为100℃时，经检验，根部、表面、断面均未出现裂纹。故该钢种焊前预热≥100℃，即可显著降低冷裂纹产生^[3]。

通过对材料进行裂纹敏感性分析，该材料为高强度钢，抗拉强度高，淬硬倾向大，焊接过程中或焊后易出现冷裂纹及再热裂纹，因此选择合适的焊接方法和焊接参数可以显著减少焊接裂纹的产生^[4]。



a) 斜Y型坡口焊接裂纹试验焊接方法



b) 斜Y型坡口焊接裂纹试验 (室温)



c) 斜Y型坡口焊接裂纹试验 (预热100℃)

图1 斜Y型坡口焊接裂纹试验焊接

表5 斜Y型坡口焊缝试验结果

试板 编号	预热 温度 /℃	表面 裂纹率 (%)	断面裂纹			
			试件 序号	表面裂 纹率 (%)	根部 裂纹率 (%)	断面 裂纹率 (%)
A	15 (常温)	0	1	0	0	6.1
			2			0
			3			0
			4			0
			5			11.1
			平均值	0	0	3.44
B	100	0	1	0	0	0
			2			0
			3			0
			4			0
			5			0
			平均值	0	0	0

2.4 焊接工艺评定的实施

评定试验母材选用07MnNiMoDR钢板和10Ni3MoVD钢锻板。评定用焊接材料选用EF1焊丝和F9P6-EF1-F1焊剂，焊丝规格为 ϕ 3.2mm。为检验不同热处理保温时间对焊接接头性能的影响以及涵盖后期焊接工艺评定，分别焊接3副试板，对3副焊接试板的焊后消除应力热处理保温时间分别按2h、4h及6h进行。

3 焊接工艺评定

3.1 焊前准备

(1) 试件准备 用于进行埋弧焊焊接工艺评定的07MnNiMoDR钢板和10Ni3MoVD钢锻板应按图2的要求进行焊接坡口的加工及清理，坡口周边的污物、杂质应清理干净，以免影响试验结果。

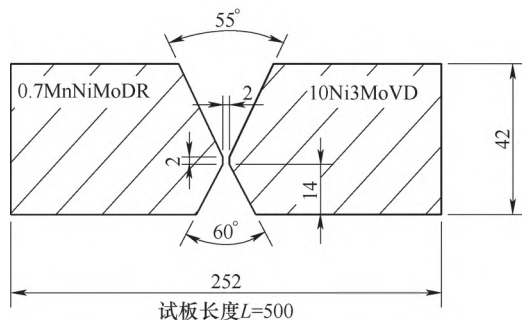


图2 埋弧焊焊接工艺评定试板加工图

(2) 焊接材料 埋弧焊焊接工艺评定采用国产EF1 (焊丝) 和F9P6-EF1-F1 (焊剂)，熔敷金属化学成分和力学性能见表6、表7。

表6 EF1/F9P6-EF1-F1熔敷金属化学成分
(质量分数) (%)

C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr	P	S
0.069	0.34	1.28	0.96	0.42	0.02	0.014	0.008

表7 EF1/F9P6-EF1-F1熔敷金属力学性能

试验项目	拉伸试验			冲击试验	
	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率(%)	(-50℃)冲击吸收能量/J	
				单个值	平均值
标准值	610~740	≥490	≥20	≥42	≥60
实测值	668	598	26	90、105、109	101

3.2 试板焊接

埋弧焊设备采用小型埋弧焊焊机。焊前对F9P6-EF1-F1焊剂进行烘干，烘干温度为350℃，保温时间为2h。焊前进行预热，预热温度为100℃，层间温度为100~150℃，焊接参数、热处理温度及保温时间见表8。焊接工艺评定试板如图3所示。

表8 埋弧焊评定试板焊接参数及热处理制度

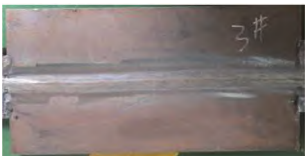
试板编号	母材	厚度/mm	焊接电流/A	焊接速度/(cm/min)	电弧电压/V	热处理温度/℃	保温时间/h
HP-31	07MnNiMoDR/10Ni3MoVD	42/42	350-450	40-55	32-36	575±15	2
HP-32	07MnNiMoDR/10Ni3MoVD	42/42	350-450	40-55	32-36	575±15	4
HP-33	07MnNiMoDR/10Ni3MoVD	42/42	350-450	40-55	32-36	575±15	6



a) HP-31



b) HP-32



c) HP-33

图3 焊接工艺评定试板

对焊缝进行100%X射线检测，符合NB/T 47013.2—2015《承压设备无损检测 第2部分：射线检测》规定的Ⅰ级合格要求。试板外观检查及无损检测结果无裂纹。为避免延迟裂纹的产生，相关的无损检测在焊接完成48h之后进行。

3.4 焊后消除应力热处理

焊接试板经无损检测合格后，进行消除应力热处理，热处理温度为(575±15)℃。为检验热处理保温时间对焊接接头力学性能的影响，并涵盖后期类似项目的焊接工艺评定，3组埋弧焊焊接试件的消除应力热处理保温时间分别按2h、4h及6h进行。并再次对试板进行100%X射线检测，试板检测结果Ⅰ级合格。

3.5 试样的制备加工

按NB/T 47014—2023《承压设备焊接工艺评定》要求，对埋弧焊焊接工艺评定试板进行力学性能试验，取样数量见表9。

3.3 试件的无损检测

焊接完成后，先进行外观检查，检查合格后

表9 埋弧焊工艺评定试板力学性能试验取样数量 (个)

评定试板编号	试验母材	拉伸试验	弯曲试验	冲击试验 ^①		硬度检测试样
			侧弯	焊缝区	热影响区	
HP-31/HP-32	07MnNiMoDR/10Ni3MoVD	4	4	3	3+3	1
HP-32	07MnNiMoDR/10Ni3MoVD	4	4	3	3+3	1
HP-33	07MnNiMoDR/10Ni3MoVD	4	4	3	3+3	1

① 因是异种钢焊接，故从两侧母材的热影响区各取3个冲击试样。

4 力学性能试验分析及结论

按要求进行力学性能试验并记录相关试验数据，经整理后的力学性能试验结果见表10，硬度检测结果见表11，硬度分布曲线如图4所示，力学性能试验试样如图5所示。

表10 埋弧焊焊接工艺评定试样力学性能试验结果

评定试板 编号	拉伸试验		弯曲试验		(-50℃)夏比V型缺口冲击试验			
	抗拉强度/ MPa	断裂部位	弯曲类型/ 试样数量 (个)	结论	试样尺寸 /mm	缺口位置	冲击吸收能量 /J	平均值 /J
HP-31	656	10Ni3MoVD侧母材	侧弯/ (4)	完好	10×10×55	焊缝区	100、104、115	106.3
	648	10Ni3MoVD侧母材				10Ni3MoVD侧热 影响区	96、115、120	110.3
	654	10Ni3MoVD侧母材				07MnNiMoDR侧 热影响区	112、118、125	118.3
	648	10Ni3MoVD侧母材						
HP-32	644	10Ni3MoVD侧母材	侧弯/ (4)	完好	10×10×55	焊缝区	97、103、110	103.3
	642	10Ni3MoVD侧母材				10Ni3MoVD侧热 影响区	93、108、118	106.3
	638	10Ni3MoVD侧母材				07MnNiMoDR侧 热影响区	108、114、121	114.3
	640	10Ni3MoVD侧母材						
HP-33	640	10Ni3MoVD侧母材	侧弯/ (4)	完好	10×10×55	焊缝区	72、80、98	83.3
	636	10Ni3MoVD侧母材				10Ni3MoVD侧热 影响区	96、105、109	103.3
	632	10Ni3MoVD侧母材				07MnNiMoDR侧 热影响区	95、105、113	104.3
	628	10Ni3MoVD侧母材						

表11 不同热处理时间焊接接头硬度

试样编号	热处理时间 /h	硬度HBW				
		10Ni3MoVD侧母材	热影响区	焊缝区	热影响区	07MnNiMoDR侧母材
HP-31	2	221	210、214	240、248、242	216、217	220
HP-32	4	219	209、213	236、233、230	214、207	224
HP-33	6	220	210、210	234、235、228	215、209	223

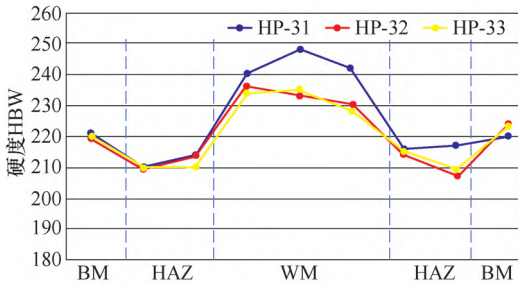


图4 不同热处理时间焊接接头硬度分布曲线

4.1 试验数据分析

(1) 抗拉强度试验数据分析 从所获得的试验数据可知，随着热处理保温时间的延长，材料的抗拉强度会有所降低，最小抗拉强度值为628MPa（HP-33），大于10Ni3MoVD钢锻件标准抗拉强度下限值（600MPa）。

(2) 低温冲击试验数据分析 冲击试样为10mm×10mm×55mm的标准试样，试验合格判定

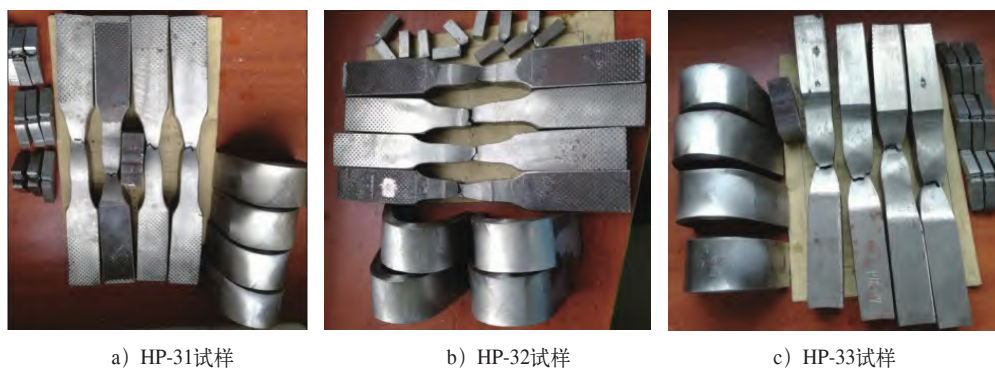


图5 焊接工艺评定试样

标准为：3个试样的冲击吸收能量平均值 $\geq 60\text{J}$ ，单个值 $\geq 42\text{J}$ 。3组评定试验中，焊缝区冲击吸收能量平均值最小为 83.3J （HP-33），试验结果均满足设计和标准要求。

（3）焊接接头硬度检测数据分析 在不同的热处理时间条件下，焊接接头的硬度基本维持在 220HBW 左右；随着热处理时间的增加，各区域硬度均有下降趋势^[5]。

4.2 结论

07MnNiMoDR钢、10Ni3MoVD钢之间采用埋弧焊接，按给定的焊接及热处理参数进行施焊和热处理，焊接接头的抗拉强度高于母材抗拉强度下限值，焊缝区、热影响区的冲击韧度、焊缝的塑性良好，满足标准和设计要求。

5 结束语

为满足生产实际需要，对07MnNiMoDR钢和10Ni3MoVD钢两种材质组合进行埋弧焊，并进行焊接工艺评定。在进行焊接工艺评定过程中，分别对焊接试板进行了不同的热处理保温时间操作，通过

取样进行拉伸试验、弯曲试验、低温冲击试验等力学性能试验并记录了相关的试验数据，其力学性能试验结果均符合标准规范的要求，所进行的3组焊接工艺评定试验结果合格。埋弧焊焊接方法在球罐产品上的应用，显著提高了产品的制造效率，同时提高了焊接质量。

参考文献：

- [1] 刘峰，庞玉华，罗远，等. 基于07MnNiMoDR钢热处理工艺窗口的热处理工艺[J]. 金属热处理，2021，46（10）：137-143.
- [2] 卢俊文，湛立宁，丁玉松，等. 低温压力容器用钢07MnNiMoDR焊接工艺研究[J]. 化工设备与管道，2022，59（5）：17-22.
- [3] 袁榕，姚佐权，陈学东. 球形储罐的建造技术及其发展趋势[J]. 压力容器，1997（1）：49-60，90.
- [4] 朱彩萍. 丙烯球罐用07MnNiMoDR钢的焊接研究[J]. 特种设备安全技术，2015（1）：57，47.
- [5] 董浩. 07MnNiMoDR钢模拟焊后热处理工艺、组织及性能研究[D]. 重庆：重庆大学，2022.

（收稿日期：20250107）

（上接第59页）

- 合金焊接接头组织及力学性能的影响[J]. 焊接技术，2024，53（8）：18-23，145-146.
- [5] 康金文，梁宝山，武永利，等. 6061铝合金超音脉冲MIG焊接头微观组织及力学性能[J]. 焊接技术，2024，53（12）：41-46，146.
- [6] 刘斌. 6061铝合金材料焊接特性及焊接工艺研究[J]. 金属加工（热加工），2010（8）：67-69.

- [7] 黄敏，刘铭，张坤，等. 铝及铝合金焊丝的研究与发展现状[J]. 有色金属加工，2008（2）：9-12.
- [8] 李汉林，何涛，霍元明，等. AA6063铝合金韧性断裂断口分析[J]. 上海工程技术大学学报，2021，35（3）：197-200，228.

（收稿日期：20250414）