

LT-FH36 低温钢 FCAW 焊接工艺试验研究及应用

朱 池

(中船澄西船舶修造有限公司综合技术部)

摘 要:在 LPG 船“波斯”轮修理中,其液货舱内、甲板板与舱壁板出现腐蚀和裂纹,母材材料为低温钢 LT-FH36,根据船检社规范,公司需要具备焊接低温钢的焊接工艺评定且须 LR 船级社认可,公司没有相应牌号的钢材 LR 认可的焊接工艺评定。为了满足船检、船东的要求,查阅相关资料,经与 LR 船级社联系协商,在他们现场验证监督下,共计做了 3 项 FCAW(药芯气体保护焊)焊接工艺认可试验,试验结果合格,最终得到 LR 船级社正式文件批复和签字认可,填补了公司低温钢药芯气体保护焊接空白,为公司修船经营接单和实际生产提供技术支持。

关键字:LT-FH36 低温钢 FCAW 焊接性 试验 应用

0 前言

低温用钢主要用于低温下工作的容器、管道和结构,如液化石油气储罐、冷冻设备及石油化工低温设备等。低温用钢可分为不含 Ni 和含 Ni 的两大类。对低温用钢的主要性能要求是保证在使用温度下具有足够的韧性及抵抗脆性破坏的能力。低温用钢一般是通过合金元素的固溶强化、晶粒细化,并通过正火或正火加回火处理细化晶粒、均匀组织,而获得良好的低温韧性。在低温用钢中常加入 V、Al、Nb 及 Ni 等合金元素,如 LT-FH36、AB-VHXX-60、KL27、KL37 等低温压力容器用钢,其中 LT-FH36 钢可用作为-60℃低温用钢。为保证低温韧性,在 LT-FH36 低温用钢中尽量降低碳含量,并严格限制 S、P 含量。

为了完成 LPG 船“波斯”轮(见图 1 所示)修理中 LT-FH36 低温钢换新,根据该钢特点,专门设计了焊接坡口,制定了药芯气体保护焊(FCAW)进行 LT-FH36 焊接工艺试验,经过焊接工艺评定,在工程中实施并取得了良好的效果。



图1 “波斯”轮

1 LT-FH36 低温钢焊接性

一般应用于 -20°C 到 -253°C 低温工作环境的焊接结构的专用钢称为低温钢，低温钢的独特性是在低温工作条件下具有足够的强度、塑性等性能。低温钢通常可按使用温度、合金含量和组织以及合金系统中有无镍、铬元素进行分类。

不含Ni的低温用钢由于其含碳量低、其它合金含量也不高，脆硬和冷裂纹倾向小，因而具有良好的焊接性，一般可不采用预热，但应避免在低温下焊接。含镍低温钢由于添加了Ni，增大了钢的淬硬性，但不显著，冷裂纹倾向不大。当板厚较大或拘束较大时，应采用适当预热。Ni可能增大热裂纹倾向，但是严格控制钢及焊接材料中的C、S及P的含量，以及采用合理的焊接工艺条件，增大焊缝成形系数，可以避免热裂纹。保证焊缝和粗晶区的低温韧性时低温用钢焊接时的技术关键。

低温钢焊接的主要问题是保证焊接接头具有良好的低温冲击韧性，母材的含碳量一般都较低，且韧性和塑性均很好。焊接接头的薄弱环节通常是在熔合线和焊道这个部位。低温钢焊接时须注意以下几点：

晶粒细化，不论是奥氏体还是铁素体型的低温钢，它们的晶粒尺寸对低温钢韧性有着很大的影响，晶粒越细，韧性越好，低温钢焊接就是要获得细晶粒的组织。所以焊接时要用小的预热量进行，要控制道间温度，不宜过高，防止金属过热而引起韧性下降的现象。

1.1 LT-FH36 低温钢的焊接性

LT-FH36 低温钢具有优良的焊接性，但焊接操作不当也会有以下几方面问题：焊缝裂纹不敏感，但易产生夹渣和气孔，尤其焊接接头焊缝中心低温冲击韧性偏低。

表 1 LT-FH36 钢的化学成分

化学成分 (%)									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V
0.07	0.20	1.54	0.007	0.002	0.01	0.01	0.01	0.004	0.001

表 2 LT-FH36 钢的力学性能

钢材	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	伸长率 (%)	冲击韧性 (-60℃) 平均值 (J)
LT-FH36	≥425	≥488	≥23	≥47

2 试验材料和焊接工艺

2.1 焊接材料和方法

本试验母材为 LT-FH36 钢, 其试板规格为: 500×150×20mm×6 块板材, 焊接材料、方法选择及化学成分见表 3、表 4 所示。焊接设备采用山东奥泰公司生产的 NBC-500 逆变式 CO₂ 气体保护焊机进行接头试样的焊接。

表 3 选择焊接方法和焊材

焊接方法	焊接材料牌号	焊接材料标准号	尺寸 (mm)	制造厂
FCAW	Supercored 81-K2	AWS A5.29 E81T1-K2C	Φ1.2	焊材

表 4 Supercored 81-K2 焊材化学成分

化学成分 (%)									
C	Si	Mn	P	S	V	Ni	Mo	Ti	B
0.07	0.43	1.36	0.005	0.002	<0.01	0.52	0.01	0.027	0.0031

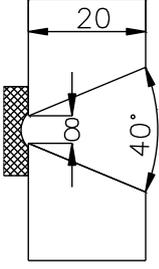
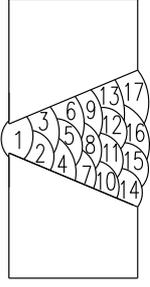
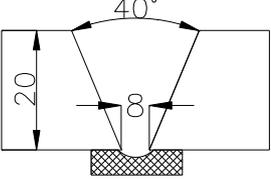
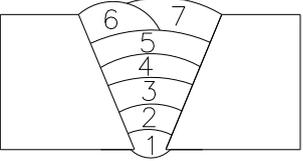
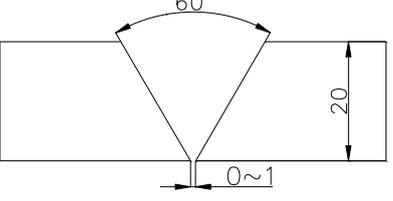
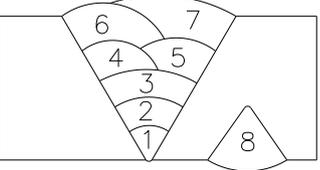
表 5 Supercored 81-K2 焊材的力学性能

焊材	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	伸长率 (%)	冲击韧性 (-60℃) 平均值 (J)
Supercored 81-K2	≥535	≥617	≥24	157

2.2 接头形式设计

设计接头形式、坡口形式与尺寸见表 5 所示。

表 5 坡口形式

接头形式	坡口角度 (°) 及精度要求 (mm)	焊缝成形
横对接		
立对接		
平对接+仰对接		

2.3 焊接工艺要领

2.3.1 焊前不需要预热，当温度低于 0℃时，需要加热温度 20℃以上。

2.3.2 采用多层多道焊，控制焊缝宽度为 16mm 以下，厚度在 3-4mm，注意影响焊接质量缺陷，应用砂轮打磨清除。

2.3.3 焊接时，焊条尽量不摆动，采取窄焊道、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，并通过多层焊的回火焊道作用细化晶粒。多道焊时，要控制道间温度，应采取小热输入焊接，二氧化碳电弧焊的热输入应控制在 0.8KJ/mm~2KJ/mm 范围内。

2.3.4 控制焊接变形，使用反变形和分段退焊的焊接顺序。尽量采用 2 人对称焊接，焊接过程中发现有变形，调整焊接顺序，为角变形凹一侧停止焊接，待凸一侧焊接没有发现变形再焊。

2.3.5 LT-FH36 低温钢焊接焊接参数 见表 6、表 7 和表 8 所示。

表 6 横对接焊接参数

焊层	焊接方法	位置	直径 (mm)	极性	电压 (v)	电流 (A)	焊接速度 (cm/min)
打底焊	FCAW	2G	Ø1.2	DCEP	26.8	175	15.74
填充焊	FCAW	2G	Ø1.2	DCEP	26-27	170-180	14-19
盖面焊	FCAW	2G	Ø1.2	DCEP	26-27	180-200	36-45

表 7 立对接焊接参数

焊层	焊接方法	位置	直径 (mm)	极性	电压 (v)	电流 (A)	焊接速度 (cm/min)
打底焊	FCAW	3G	Ø1.2	DCEP	26.2	160	7.28
填充焊	FCAW	3G	Ø1.2	DCEP	25-27	160-170	7.5-10
盖面焊	FCAW	3G	Ø1.2	DCEP	26-27	170-200	16-19

表 8 平对接+仰对接焊接参数

焊层	焊接方法	位置	直径 (mm)	极性	电压 (v)	电流 (A)	焊接速度 (cm/s)
打底焊	FCAW	1G	Ø1.2	DCEP	26.5	180	19
填充焊	FCAW	1G	Ø1.2	DCEP	26-28	190-210	22-25
盖面焊	FCAW	1G	Ø1.2	DCEP	26-28	190-210	22-25
打底焊	FCAW	4G	Ø1.2	DCEP	24-25	160-170	14-20
盖面焊	FCAW	4G	Ø1.2	DCEP	24-25	165-175	15-21

2.3.6 焊后处理，焊接 LT-FH36 低温用钢，应注意避免弧坑、未焊透及焊缝成形不良等缺陷。焊后应认真检查内在及表面缺陷，并及时修复。低温下由缺陷引起的应力集中将增大结构低温脆性破坏倾向。焊后消除应力处理可以降低低合金低温用钢焊接产品的脆断危险性。对于有弧坑裂纹的接头，采取使用砂轮打磨接头呈 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 的斜坡，并避免出现深而窄的坡口。

3 试验结果及分析

3.1 无损检测

对本次试验横、立对接焊和平+仰对接焊进行无损检测。按照 CB/T3558-2011 射线检测标准进行 100%RT 检测，并按照 CB/T3958-2004 磁粉检测标准进行 100%MT 检测，试样无裂纹、未焊透、气孔等缺陷，试样均为 I 级合格。

3.2 力学性能测试及分析

3.2.1 拉伸试验

按照 LR 标准从接头部位截取试样进行拉伸试验。在 3 块焊接试板上分别取拉伸试验进行拉伸试验，抗拉强度结果见表 9 所示。

表 9 横向拉伸试验结果

焊接位置	试样编号/类型	抗拉强度 (Mpa)	断裂位置
横对接	811 横向拉伸	611	断于母材
	812 横向拉伸	615	断于母材
立对接	911 横向拉伸	602	断于母材
	912 横向拉伸	600	断于母材
平对接+仰对接	1011 横向拉伸	615	断于母材
	1012 横向拉伸	617	断于母材

3.2.2 弯曲试验

力学性能试验 根据 LR 标准规定进行了力学性能试验，弯曲性能检测结果表明，焊接接头强度与原始母材的强度略高。横向侧弯 12 组，试验厚度 20mm，弯轴直径 D=40mm，弯角 180°，试验弯曲到规定的角度后，没有开口缺陷。拉伸性能、横向弯曲试验均满足 LR 标准要求。

3.2.3 冲击试验

根据 LR 船级社规范要求，对于每块焊接试板取 3 组冲击，冲击温度为-60℃，试验结果见表 10。

表 10 冲击试验结果

焊接位置	缺口位置	-60℃冲击值 (J)			平均值 (J)	规范要求
横对接 H	焊缝中心	122	150	150	141	-60℃ ≥47J
	熔合线	212	168	216	199	
	熔合线+1mm	200	182	198	193	
	熔合线+3mm	210	223	162	198	
	熔合线+5mm	222	240	183	215	
立对接 V	焊缝	124	116	96	112	
	熔合线	265	124	232	207	
	熔合线+1mm	202	212	166	193	
	熔合线+3mm	254	220	170	215	

	熔合线+5mm	212	226	212	217	-60℃ ≥47J
平+仰对接 F+0	焊缝中心	54	55	47	52	
	熔合线	50	124	48	74	
	熔合线+1mm	216	164	152	177	
	熔合线+3mm	272	235	216	241	
	熔合线+5mm	218	232	238	229	

由表 5 可知，三块试板在-60℃的温度下都具有良好的冲击性能，符合 LR 船级社规范。

3.2.4 硬度试验

硬度试验采用维氏硬度法，规范要求其硬度值不超过 HV350。试验结果见图 2、图 3 和图 4 所示。

由图 2、图 3、图 4 试验结果可知，焊缝、热影响区以及母材的焊后硬度均没有超过规范要求，试验结果合格。

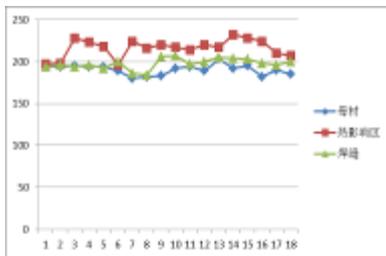


图 2 横对接焊硬度结果

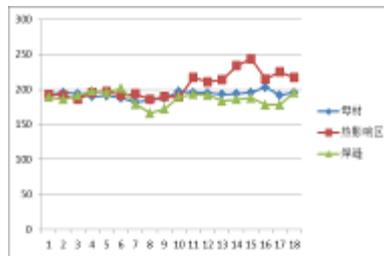


图 3 立对接焊硬度结果

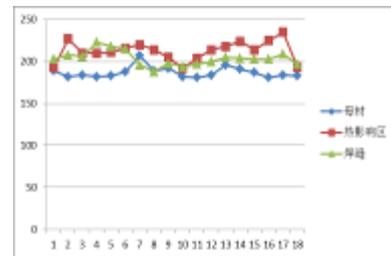


图 4 平+仰对接焊硬度结果

3.2.5 宏观金相

三个焊接试样，焊缝熔透、熔合区、热影响区熔合无裂纹，未发现气孔、夹渣等缺陷，如图 5 所示，结果表明焊接试样合格。



a) 横对接焊



b) 立对接焊



c) 平+仰对接

图 5 试样宏观金相

3.3 试验结论

经过以上试验，试验数值均满足试验前的预期结果，工艺试验获得 LR 船级社认可。

4 实船应用

经过以上 LT-FH36 低温钢焊接工艺试验，其中 3 项低温钢 LT-FH36 钢焊接工艺评定取得了 LR 船级社认可；LT-FH36 换新区域焊缝表面质量无可见气孔，裂纹，咬边等缺陷，对现场换板进行 UT 和 MT 探伤，检验结构 100%合格，保证“波斯”、“安纳吉”、“自由号”轮前后共计 3 条船按期修理及顺利出厂，共计换板 3.9 吨，低温钢焊材用量达 480 余千克。

通过“波斯”轮 LT-FH36 低温钢的焊接成功实践，使我们掌握了 LT-FH36 低温钢的焊接，积累了经验数据，对今后船舶建造、修理及改装结构制造及此类材料的提供了宝贵经验。

5 结束语

首先对于 LT-FH36 此种特殊类型 LPG 船用低温钢材，国内 LPG 船制造厂家少且焊接技术保密，网上和相关资料介绍甚少，其次 LT-FH36 其焊接性一般，焊接关键是保证焊缝和粗晶区的-60℃低温韧性，对于材料性能、焊接性能以及操作技巧都没有经验可循。

我们通过详细的理论和试验研究，通过选取高质量焊材、精确控制焊道间层温和每道焊接热输入，解决了低温钢易产生裂纹和焊缝低温冲击下降焊接技术难题。最终焊接工艺试验和实船应用获得船东和船检满意及认可。

“波斯”、“自由号”和“安纳吉”系列 LPG 船实船应用成功，保证了该船修理周期，为公司节约了成本。表明我们已掌握了此类低温钢焊接技术，提升了公司特种高附加值船舶修理技术实力。为公司未来承接类似产品做好技术储备，并积累了宝贵经验。

通过低温钢板换新修理，规范了焊工对热输入量控制要求，提高了焊工对 LT-FH36 钢操作技能。

[参考文献]

- [1]船舶焊接手册编写委员会, 船舶焊接手册. 北京: 国防工业出版社, 1995
- [2]周振丰, 张文钺. 焊接冶金与金属焊接性(第2版). 北京: 机械工业出版社, 1988
- [3]中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册M. 北京, 机械工业出版社, 2003
- [4]陈裕川. 低合金结构钢的焊接. 北京: 机械工业出版社, 1992
- [5]王从曾等. 材料性能学. 北京工业大学, 2001
- [6]2017 Rules for the survey and construction of steel ship Class LR



江苏船舶微信公众号



江苏船舶网上投稿系统

仅供交流