

X65MO 海底管线钢焊接适应性研究

王凤会, 陈延清, 郭占山, 张建强, 刘 宏, 齐 建
(首钢技术研究院, 北京 100043)

摘 要: 采用多丝埋弧焊设备对首钢公司生产的 15.9 mm 厚 X65MO 海底管线钢进行了焊接工艺试验研究。通过金相试验分析了焊接接头的显微组织; 通过拉伸、冲击、弯曲、硬度、CTOD 试验评价了焊接接头的力学性能; 通过 HIC 试验评价了接头的抗 HIC 腐蚀性能。试验结果表明, X65MO 海底管线钢焊接接头的力学性能和抗 HIC 腐蚀性能均达到相应技术标准的要求, 能够满足用户的使用要求。

关键词: 焊接; 管线钢; X65MO; 焊接接头; 抗氢致开裂腐蚀

中图分类号: TE973

文献标志码: A

文章编号: 1001-3938(2014)09-0005-05

Research on Welding Adaptability of X65MO Submarine Pipeline Steel

WANG Fenghui, CHEN Yanqing, GUO Zhanshan, ZHANG Jianqiang, LIU Hong, QI Jian
(Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100043, China)

Abstract: Multi-wires submerged arc welding device was adopted to study the welding technology test of X65MO submarine pipeline steel with 15.9 mm thickness produced in Shougang. The microstructure of welded joint was analyzed by using metallographic test. Tensile test, impact test, bending test, hardness test and CTOD test were applied to evaluate the welded joint mechanical performance. And HIC test was adopted to analyze the HIC corrosion resistance properties. The results showed that the mechanical and anti-corrosion properties meet the requirements of the relevant technical standards and demands of the users.

Key words: welding; pipeline steel; X65MO; welded joint; hydrogen induced cracking resistance

0 前 言

随着海上油气田的不断开发, 海洋石油的开采逐渐从近海向深海发展, 海底油气运输管道已成为广泛用于海洋石油工业的重要运输手段, 并且成为连续大量输送油气最快捷、最安全、最经济有效的方式。我国海洋资源丰富, 石油资源量为 240 亿 t, 天然气资源量为 14 万亿 m³, 开发和利用这些资源对于油气需要进口的我国具有非常重要的意义。因此, 国内相关企业正积极研发海底管线钢^[1-3]。

海底管线管除对强度、硬度、延伸率等常规

指标有明确规定外, 对碳当量、裂纹敏感系数、低温冲击韧性、屈强比、交货状态、坡口加工、定尺以及剩磁等要求亦极为严格, 同时对钢管的焊接性能指标也提出了更为严格的要求^[4-6]。特别是输气管道, 对于焊接区域, 如焊缝、熔合线、热影响区的硬度、冲击韧性及组织等方面不但要求严格, 而且对焊缝的强度、压扁性能、抗弯曲性能亦有严格的约定。另外, 由于海底油气田中 H₂S 含量的增加, 对海底管线钢焊接接头的抗氢致开裂(HIC)性能也要求很高^[7]。管线管焊接性能的检验, 被看作是一种对生产工艺水平、钢种设计的合理性及参数指标控制水平的综合考核

手段。为此,对首钢集团公司生产的 15.9 mm 厚 X65MO 海底管线钢进行了焊接工艺评定及 HIC 性能腐蚀试验,以验证微合金化钢种设计及工艺设计的合理性。

1 试验材料及方法

1.1 焊接接头制备

试验材料选择了首钢公司生产的 15.9 mm 厚的 X65MO 海底管线钢,材料的主要化学成分见表 1,力学性能见表 2。埋弧焊对接钢板尺寸为 600 mm×200 mm×15.9 mm,坡口为 X 形,钝边为 5 mm,坡口角度内焊为 75°、外焊为 80°。钢板外焊道预先打底,打底焊接工艺采用 CO₂ 气

体保护焊,焊丝选用大西洋焊接材料公司生产的 H60C 焊丝。埋弧焊接采用三丝埋弧焊,埋弧焊丝与焊剂分别选用宝鸡宇生焊接材料有限公司生产的 H08DG 焊丝与 YS-SJ101 焊剂,埋弧焊接工艺参数见表 3。

表 1 X65MO 海底管线钢化学成分 %

$w(C)$	$w(Si)$	$w(Mn)$	$w(P)$	$w(S)$	$w(Ni+Cr+Nb+Ti)$
0.059	0.26	1.52	0.010	0.001 3	0.455

表 2 X65MO 海底管线钢力学性能

R_{el}/MPa	R_m/MPa	R_{el}/R_m	-20 °C 平均冲击吸收功/J
530	598	0.89	454

注:① R_{el} 为下屈服强度, R_m 为抗拉强度, R_{el}/R_m 为屈强比。

②冲击功测量位置为板厚中心处,试样尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm。

表 3 焊接工艺参数

焊接位置	电流/A			电压/V			焊速/(m/min)	热输入/(kJ/cm)
	1 丝	2 丝	3 丝	1 丝	2 丝	3 丝		
内焊	850	670	470	33	35	38	1.5	27.74
外焊	980	610	460	33	36	39	1.5	28.90

1.2 试验方法

按照管线钢力学性能检测标准,制取了钢板焊接接头的拉伸、冷弯、冲击和硬度试样,并进行了相关试验。采用 WE-100 型拉力试验机对焊接接头进行横向拉伸性能测试;采用 ZBC2452-3 型冲击试验机检测焊接接头各区域冲击吸收功;采用 HVS-10Z 型维氏硬度计测试焊接接头各区域的硬度,加载力为 98 N (10 kgf);采用 OLYMPS 激光共焦显微镜(OM)对焊接接头显微组织进行观察。焊接接头的硬度测试位置如图 1 所示。按照 CTOD 标准,制取了焊缝中心的裂纹尖端张开位移(CTOD)检测试样,在-10 °C 下评价焊缝的 CTOD 性能。CTOD 试样形状如图 2 所示,试样槽深沿焊道方向。

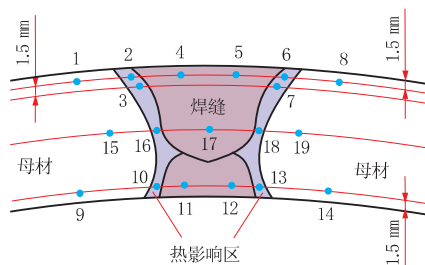


图 1 焊接接头硬度测试位置

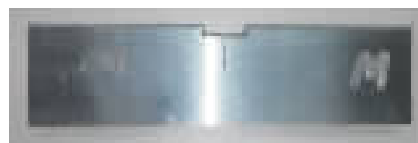


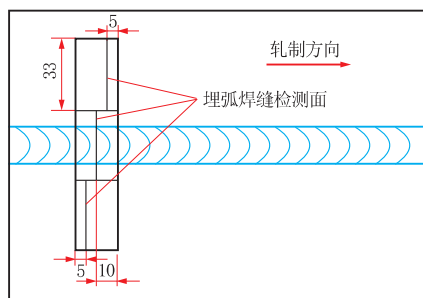
图 2 CTOD 检测试样形状

1.3 HIC 试验

按照 NACE 标准 TM0284—2003 对焊缝接头进行 HIC 试验检测,取样位置及试样实物照片如图 3 所示,试样尺寸为 100 mm×20 mm×15 mm,共取 3 个试样。

试样腐蚀步骤为:首先准备 5% NaCl 溶液,溶液体积与试样表面积的比例应在(3~6) cm³/cm² 的范围内;用醋酸调节溶液使 pH 值达到 2.8~3.3,试验过程中溶液的制备及 pH 值的控制等都需经过委托人的检测与允许;持续向溶液中通入 1 h 的氮气以除氧,通气速率为 100 mL/min;最后将试样窄的一面放在容器的底部,并用直径为 6 mm 的 PTFE(聚四氟乙烯)或者玻璃圆棒分开。

根据图 3 给出的腐蚀试样检测面的要求进行切割,并检查指示表面。对每个截面进行金相抛光、浸蚀,这样可以将裂纹与小的夹杂物、分



(a) 取样位置



(b) 试样照片

图 3 焊接接头 HIC 试验取样位置及试样照片

层、擦痕等区别开来。但浸蚀处理时，只应对截面进行轻微的浸蚀处理，否则可能导致小的裂纹模糊。采用金相显微镜对制备的金相试样进行裂纹检测，裂纹测量方法如图 4 所示。

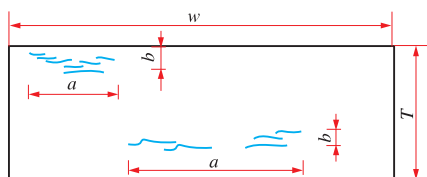


图 4 裂纹测量方法

测量裂纹的长度和宽度时，相距小于 0.5 mm 的裂纹应视为一个裂纹，所有以使用不大于 100 倍的放大镜可区别的裂纹应包括在结论内。但那些全部位于内、外面 1 mm 内的裂纹除外。在检测某些断面时，可能需要更高的放大倍数，以区分是微小裂纹，还是夹杂物、侧面点蚀或其它的不连续现象。每个金相截面的裂纹敏感性比值

(*CSR*)、裂纹长度比值 (*CLR*) 及裂纹厚度比值 (*CTR*) 的计算方法分别按式(1)、式(2) 和式(3) 进行。

$$CSR = \frac{\sum ab}{wT} \times 100\% \quad , \quad (1)$$

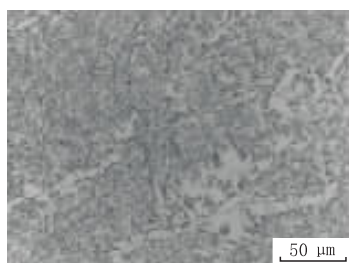
$$CLR = \frac{\sum a}{w} \times 100\% \quad , \quad (2)$$

$$CTR = \frac{\sum b}{T} \times 100\% \quad 。 \quad (3)$$

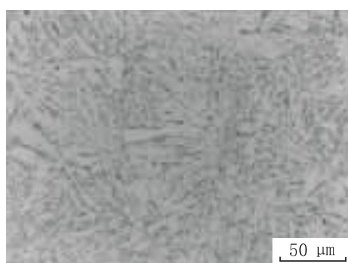
2 试验结果及讨论

2.1 焊接接头金相组织

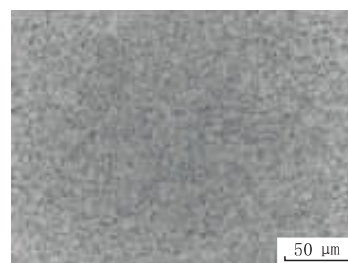
X65MO 海底管线钢焊接接头外焊缝的金相组织如图 5 所示。由图 5 可知，焊缝金属获得以针状铁素体为主+少量先共析铁素体的组织；粗晶区获得以粒状贝氏体为主+少量针状铁素体的组织；细晶区以等轴状铁素体组织为主；不完全



(a) 焊缝



(b) 粗晶区



(c) 细晶区

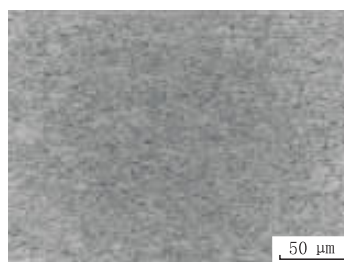
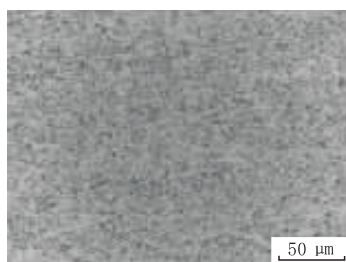


图 5 X65MO 海底管线钢焊接接头外焊缝的金相组织

正火区以等轴状铁素体为主+少量针状铁素体的组织；母材的组织为针状铁素体组织。焊接接头各个位置的组织具有优良的塑性，能保证接头具有优良的力学性能。

2.2 焊接接头力学性能

X65MO 海底管线钢埋弧焊焊接接头拉伸、冷弯、冲击试验结果见表 4 和表 5。焊接接头试样拉伸后的形貌如图 6 所示，冷弯后试样的形貌如图 7 所示。焊接接头的硬度测试结果如图 8 所示。

由图 6 可知，焊接接头拉伸试样断裂于母材位置，其抗拉强度大于标准要求，说明接头具有

表 4 焊接接头的拉伸和弯曲性能

项目	拉伸性能		弯曲性能	
	R_m /MPa	断裂位置	正弯	背弯
实测值	592	母材	合格	合格
标准要求	≥ 535	报告断裂位置	弯曲后，试样任何部位不得出现超过 3 mm 长度的缺陷	

注：冷弯试验条件，弯曲角度为 180°， $d=3a$ (d 为弯心距， a 为试样厚度)。

表 5 焊接接头的冲击性能

项目	-16℃冲击吸收功/J							
	焊缝中心		熔合线		熔合线+2 mm		熔合线+5 mm	
	单值	均值	单值	均值	单值	均值	单值	均值
实测值	76, 164, 117	119	193, 233, 257	228	303, 297, 293	298	320, 317, 296	311
标准要求	单个试样最小值 ≥ 38 ，三个试样平均值 ≥ 45							



图 6 焊接接头试样拉伸后的形貌



(a) 正弯



(b) 背弯

图 7 焊接接头冷弯后的形貌

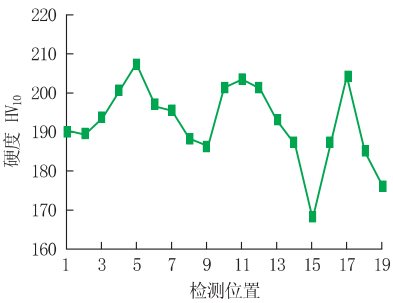


图 8 焊接接头的硬度检测结果

良好的拉伸性能。由图 7 可知，背弯和面弯试验后，弯曲试样任何部位均未发现超过 3 mm 长度的缺陷，焊接接头塑性良好，具有较好的冷弯性能。由图 8 可知，焊接接头各个位置的硬度 $\leq 270 \text{ HV}_{10}$ ，且不存在明显的硬度突变，焊接接头不存在脆化带。

CTOD 试验是一种评价焊接接头抗断裂性能的有效方法。表 6 给出了 CTOD 试验的检测结果。由表 6 可以看出，X65MO 焊缝 CTOD 检测的 δ 均大于技术要求，说明接头焊缝具有较好的抗断裂性能。

表 6 焊缝 CTOD 检测结果

项目	δ /mm	
	单值	均值
实测值	0.31, 0.41, 0.45	0.39
技术要求	>0.2	

2.3 HIC 腐蚀试验结果

焊接接头抗 HIC 腐蚀试样经过腐蚀后的表面形貌如图 9 所示。腐蚀试样不同检测面的金相组织如图 10 所示, 图中 a, b 和 c 分别为试样不同的检测面, a 面和 c 面只有母材, b 面含有焊缝。

由图 9 可以看出, 试样表面均未出现鼓泡。X65MO 海底管线钢母材和焊缝接头抗 HIC 腐蚀试验结果表明, 腐蚀试样中均未发现裂纹, 所有试样检测面的裂纹敏感性比值(CSR)、裂纹长度



图 9 试样 HIC 腐蚀后的表面形貌

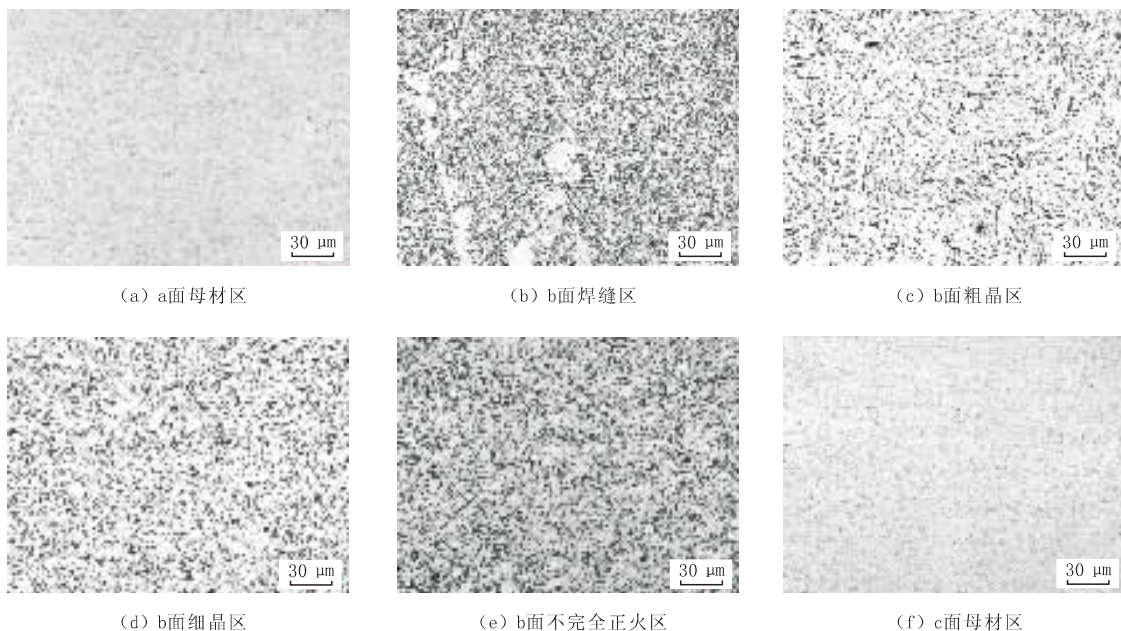


图 10 1# 试样不同检测面的金相组织

比值(CLR)及裂纹厚度比值(CTR)均为 0, 说明 X65MO 焊接接头具有优异的抗 HIC 腐蚀性能。

试验结果表明, X65MO 成分设计合理, 在含 H_2S 溶液条件下, 对比传统钢提高了其耐腐蚀性能, 降低表面析氢量和表面 H 吸附量; 母材组织和焊缝组织具有较好的 H 扩散性能, 硬度控制合理, 降低了 HIC 风险; 夹杂物尺寸、形态控制合理, 未见明显的 Ca-Al-O 的链状夹杂物, 母材 1/4 处未见明显的夹杂物聚集分布区, 中心部位未发现带状偏析带, 整体提高了材料和焊接接头的抗 HIC 性能。

3 结 论

(1) X65MO 焊接接头具有优异的力学性能, X65MO 多丝埋弧焊适应性良好。

(2) CTOD 试验结果表明, X65MO 焊接接头具有良好的抗脆性断裂性能。

(3) HIC 腐蚀试验结果表明, X65MO 焊接接头具有优异的抗 HIC 腐蚀性能。

参考文献:

- [1] 牛爱军, 毕宗岳, 牛辉, 等. X70 厚壁海底管线钢研制[J]. 焊管, 2013, 36(10): 26-30, 35.
- [2] 刘梁华, 张世富. 海底管线发展现状浅述[J]. 中国储运, 2011(11): 108-109.
- [3] 丁文华, 姜中行, 白学军. 厚壁海底管线用 X70 钢板的研制与开发[J]. 轧钢, 2012, 29(01): 16-18.
- [4] 邓彩艳, 张玉凤, 霍立兴, 等. 海底管线钢焊接接头的安全评定及寿命预测[J]. 中国造船, 2005, 46(B11): 387-393.
- [5] 张莉, 张玉凤, 霍立兴, 等. X65 管线钢焊接接头低温韧性及安全评定的研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(06): 553-556.

(下转第 13 页)

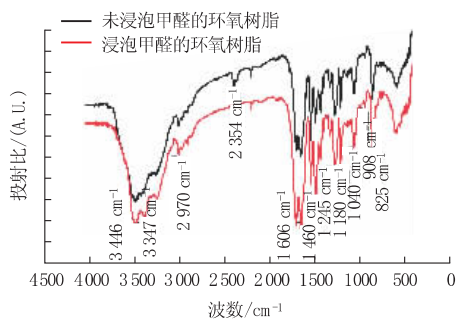


图3 浸泡甲醇前后环氧树脂试样的 FTIR 光谱

O-H 伸缩振动峰^[12]。

对于在甲醇溶液中浸泡 7 天后的环氧树脂, 其红外吸收谱在 $1\,460\text{ cm}^{-1}$, $1\,606\text{ cm}^{-1}$ 以及 $3\,347\text{ cm}^{-1}$ 处的透过率增强, 表明浸泡后的环氧树脂内 N-H、苯环骨架和甲基 C-H 键伸缩振动加快; 而在 $2\,354\text{ cm}^{-1}$ 处的 C-N 键振动减弱。这可能是由于甲醇能够渗入环氧树脂中, 使环氧树脂部分水解, 产生胺类物质。部分胺类物质存在于树脂内, 小部分溶出树脂并进入甲醇溶液中, 导致甲醇溶液进行高锰酸钾测试时, 其使高锰酸钾脱色所需时间缩短。为了进一步证实胺类可与高锰酸钾快速反应, 在甲醇中加入痕量的有机胺, 发现不到 0.05 mL 的胺类加入 50 mL 甲醇溶液中可瞬间使高锰酸钾褪色, 而纯甲醇溶液使高锰酸钾褪色的时间大于 100 min 。因此, 环氧树脂固化剂中的胺可溶解于甲醇中, 由于固化剂中胺的溶解, 可能使环氧树脂的分子链变短, 进一步使得环氧树脂溶解。

3 结 论

采用环氧树脂、环氧富锌底漆、黑色环氧抗静电面漆、胺类固化剂等分别配制的防腐涂料应用于甲醇储罐中, 甲醇能够渗入防腐涂层内部,

并使部分溶解的胺类物质、锌粒子、活性炭物质溶入到甲醇溶液中, 污染甲醇溶液, 导致甲醇质量不合格。这种胺类固化剂固化的环氧树脂防腐涂料不适宜应用到甲醇储罐的防腐中。

参考文献:

- [1] 何川华, 储伟, 罗仕忠, 等. 低温液相甲醇合成催化剂研究进展[J]. 天然气化工, 2000, 25(03): 41-44.
- [2] 李忠, 郑华艳, 谢克昌. 甲醇燃料的研究进展与展望[J]. 化工进展, 2008, 27(11): 1684-1694.
- [3] 刘宗海, 李雪梅, 李序城. 甲醇燃料发展形势及建议[J]. 现代化工, 2011, 31(05): 4-6.
- [4] 刘玲莉. 原油储罐底板的腐蚀与阴极保护防腐[J]. 石油工程建设, 1994(04): 29-33.
- [5] 周逢森. 甲醇储罐的防腐技术[J]. 安徽化工, 2011, 37(06): 52-53.
- [6] 王德全. 环氧树脂生产与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [7] 黄丽, 郑华荣. 环氧无溶剂防腐涂料耐酸性的研究[J]. 材料工程, 2009, (S2): 161-163, 168.
- [8] 胡高平, 袁红英, 肖卫东. 金属用胶黏剂及黏接技术[M]. 北京: 北京工业出版社, 2003.
- [9] 贾昕宇. 破解甲醇储罐防腐问题[J]. 河北化工, 2009, 32(05): 1-3.
- [10] 张思聪, 张静. 提高甲醇高锰酸钾检测的准确度[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2011(06): 43-45.
- [11] 张智新. 石膏转化分解法生产硫酸[P]. CN:101531346A, 2009.
- [12] 袁骏. 红外光谱分析在环氧树脂与胺固化剂反应中的一些简单应用[J]. 上海涂料, 2003, 41(02): 30-34.

作者简介: 冯拉俊(1957—), 男, 博士, 博士生导师, 主要从事腐蚀与防护的研究。

收稿日期: 2014-06-06

编辑: 李超

(上接第 9 页)

- [6] 周灿丰, 焦向东, 陈家庆, 等. 高强度海底管线钢焊接性研究进展[J]. 北京石油化工学院学报, 2010, 8(03): 27-31.
- [7] 杨秘, 赵东胜, 王聚锋, 等. X65 管线钢焊接接头抗 H_2S 应力腐蚀开裂性能[J]. 油气储运, 2013, 32(03): 334-338.
- [8] 张业圣, 李志卫. 海洋石油用管的发展现状和前景展望[J]. 钢管, 2009, 38(05): 1-10.
- [9] 李少坡, 李家鼎, 查春和, 等. 大壁厚 X80 管线钢的低温

韧性研究[J]. 轧钢, 2010, 27(06): 60-63.

- [10] 王建平, 霍立兴, 许永泰, 等. 海底油气外输管线的断裂和疲劳评定[J]. 管道技术与设备, 2006(06): 6-7.

作者简介: 王凤会(1988—), 男, 硕士, 主要从事金属焊接性研究和焊接材料开发工作。

收稿日期: 2014-05-22

编辑: 谢淑霞