

简析海洋环境用 HFW 钢管的质量控制

杨连河, 高国军

(中海石油金洲管道有限公司, 浙江 湖州 313000)

摘要: 主要介绍并分析了在海洋环境中高频直缝焊接钢管焊缝的耐腐蚀性能、抗断裂性能(CTOD)、质量稳定性及质量保障体系; 提出了提高高频直缝焊接钢管焊缝的耐腐蚀性能和质量稳定性的措施及有待深入研究的方向。分析认为: 采用更低 S 含量的钢卷, 可减少沟槽腐蚀的产生; 焊缝经淬火+回火热处理工艺后, 其抗 HIC 腐蚀性能更好。

关键词: 高频直缝焊接钢管; 海洋环境; 耐腐蚀; 抗断裂性能; 质量稳定性

中图分类号: TG335.75 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-2311(2013)03-0051-04

A Brief Discussion on Quality Control of HFW Steel Pipe for Marine Service

YANG Lianhe, GAO Guojun

(CNOOC Kingland Pipeline Co., Ltd., Huzhou 313000, China)

Abstract: Dealt with in the paper are descriptions and analysis of the corrosion resistance, fracture resistance (CTOD), quality stability and quality assurance system of the marine-service HFW pipe. Also proposed are measures to improve the corrosion resistance and quality stability of the said pipe's weld seam as well the in-deep research orientation in this field. The analysis leads to such a conclusion that groove corrosion could be reduced by using strip steel with much lower S content, and that higher HIC resistance could be obtained by means of getting the welding seam undergo the heat treatment process of quenching + tempering.

Key words: HFW steel pipe; marine environment; corrosion resistance; fracture resistance(CTOD); quality stability

高频直缝焊接(HFW)钢管在油气输送管线中得到广泛应用, 尤其在海洋和含 CO₂、H₂S 等酸性腐蚀环境中已经开始应用, 但是由于 HFW 钢管的焊缝耐腐蚀性能和质量稳定性存在一定的不足, 使其在海洋环境中的应用仍受到限制。中海石油金洲管道有限公司(简称中海金洲)根据近几年来生产海底管线钢管的经验, 基本解决了这一问题, 使已提供给用户的 15 万 t HFW 海底管线钢管至今仍能正常服役。本文主要介绍中海金洲在减小 HFW 钢管焊缝的沟槽腐蚀、提高焊缝质量稳定性、解决焊缝低温冲击韧性和断裂韧性等方面的经验。

1 HFW 钢管的焊缝沟槽腐蚀

海底管线要求所使用的管线钢管的化学成分、焊缝热处理状况和生产工艺路线对焊缝沟槽腐蚀是不敏感的。在很多文献中提出海洋环境中会产生沟槽腐蚀现象^[1]。HFW 钢管的沟槽腐蚀主要产生在焊缝位置, 如图 1 所示。一般认为, HFW 钢管焊缝沟槽腐蚀产生的原因: ①焊缝组织不同于母材的铁素体+珠光体组织, 同时由于快速加热和冷却而导致焊缝处存在较大的残余应力; ②由于热轧钢卷存在沿着轧制方向的金属流线, 焊接时在挤压力作用下与内外表面形成上升的角度。在金属流线上存在着非金属夹杂物(如 MnS)等^[2], 当钢管处于腐蚀环境时, 沟槽腐蚀就会沿着非金属夹杂物 MnS 富集区的金属流线开始腐蚀, 腐蚀原理如图 2 所示。沟

杨连河(1977-), 男, 工程师, 副总工程师, 主要从事 HFW 钢管的工艺技术及产品研究工作。

槽腐蚀的产生和扩大可以描述为以下 3 个步骤：一是在焊接时 MnS 熔化后的快速沉淀而形成富 S 区域；二是 MnS 富集区产生坑腐蚀；三是在焊缝和母材之间形成巨大的腐蚀坑即形成沟槽。

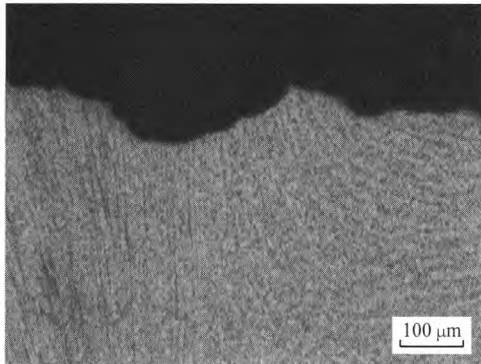


图 1 HFW 钢管焊缝沟槽腐蚀形貌

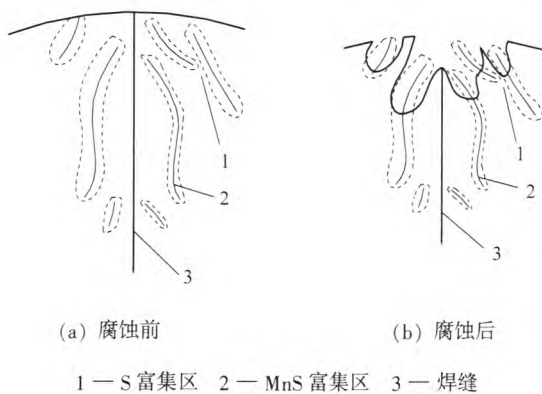


图 2 HFW 钢管焊缝腐蚀原理示意

采取焊缝热处理和改变化学成分的方法可以有效减小焊缝的沟槽腐蚀。焊缝热处理可以有效减小 S 富集区，减弱焊缝和母材之间的组织差异，以及减少焊缝的残余应力。但由于 HFW 钢管的焊缝在线热处理时间较短，因此不能完全消除沟槽腐蚀。对 X65M 钢级 $\Phi 323.9 \text{ mm} \times 12.7 \text{ mm}$ 海底管线钢管的焊缝进行沟槽腐蚀试验，在 3%NaCl 中性溶液中进行 -550 mV 控电位极化 144 h，试样 1 焊缝经过正火热处理，试样 2 焊缝未经热处理，试验结果见表 1。降低钢中 S 含量可以有效减少 MnS 附近 S 的富集，有助于减少沟槽腐蚀。

2 HFW 钢管焊缝抗 HIC 腐蚀性能

海底管线钢管多数使用双层管，外层的钢管作为套管，内层的钢管是输送用管，内层管和外层管

表 1 X65M 钢级 $\Phi 323.9 \text{ mm} \times 12.7 \text{ mm}$ 海底管线钢管焊缝沟槽腐蚀试验结果

试样编号	热处理状态	沟槽腐蚀敏感系数				结论
		1	2	3	平均值	
1	在线正火	1.13	1.17	1.16	1.15	不敏感
2	未热处理	1.56	1.53	1.62	1.57	敏感

之间采用保温层^[3]。作为输送油气用的内层管在酸性环境下要求具有良好的抗 HIC(氢致开裂)腐蚀性能。在较小直径的 HFW 钢管生产中，需要采购两倍工作宽度的钢卷进行纵剪，由于钢带存在化学成分中心偏析，纵剪后的钢带有一边存在化学成分偏析，在焊接时通过加热和挤压，使非金属夹杂物残留在焊缝熔合线周围及钢管表面；因此，这些非金属夹杂物影响了焊缝的抗 HIC 腐蚀性能。

为了提高 HFW 钢管焊缝的抗 HIC 腐蚀性能，需要从原料、焊接工艺参数和焊缝热处理工艺方面入手^[4]。首先是提高原料的纯净度，减小或消除钢带化学成分中心偏析，为焊接奠定良好的基础。新的焊缝在线热处理工艺即焊缝淬火+回火的热处理工艺代替正火热处理工艺，可以有效提高焊缝的抗 HIC 腐蚀性能^[5]，结果见表 2。从试验结果可以看出：编号 Q-H 的裂纹长度率(CLR)、裂纹厚度率(CTR)、裂纹敏感率(CSR)3 个指标的平均值最低，说明焊缝通过淬火+回火的热处理工艺具有良好的抗 HIC 腐蚀性能。再者，焊接工艺参数直接影响夹杂物的形成，也是提高焊缝抗 HIC 腐蚀性能的关键，表 2 的试验结果表明：较窄的熔合线宽度和较大的金属流线角度可以明显提高焊缝的抗 HIC 腐蚀性能^[6]。

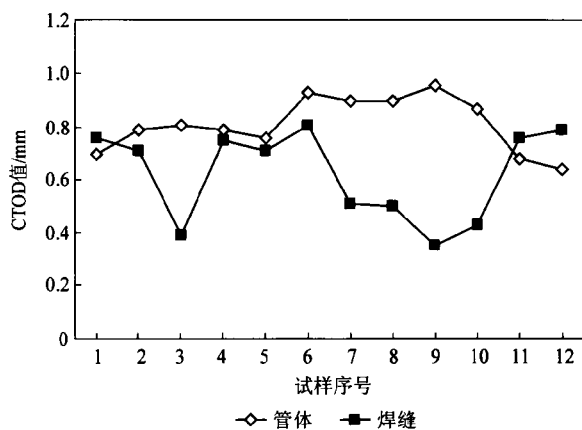
3 HFW 钢管焊缝的 CTOD 试验

CTOD(裂纹尖端张开位移)是指张开型裂纹的尖端在外力作用下所张开的距离。在 CTOD 试验中，把要测试的材料或焊接接头做成带有预制裂纹的试样，加上外力后，可以测定 CTOD 值。CTOD 值的大小反映了受试材料或焊接接头的抗开裂能力(即韧性)的高低。CTOD 值越大，表示裂纹尖端处材料的抗开裂性能越好，即韧性越好；反之，CTOD 值越小，表示裂纹尖端处材料的抗开裂性能越差，即韧性越差。在国际 DNV-OS-F101-2005《海底管线》规范中要求首批检验时对焊缝、管体进行 CTOD 试验，以检验管体和焊缝抗开裂的能力，

表2 X65M 钢级 $\Phi 323.9 \text{ mm} \times 12.7 \text{ mm}$ 海底管线钢管焊缝抗 HIC 试验结果

编号	焊缝热处理工艺	熔合线宽度/mm	金属流线角度/(°)	CLR/%	CTR/%	CSR/%	
A-H	正火	0.18	61	17、5.77、0	7.4、2.17、0	1、0.37、0	
B-H	正火	0.12	69	0、1.67、12.3	0、2.13、2	0、0.11、0.8	
E-H	正火	0.08	78	1.17、1.38、0	2.47、0.98、0	0.09、0.04、0	
Q-H	淬火+回火	0.08	78	0.69、0、0	0.44、0、0	0.09、0、0	
NACE TM0284—2003 标准要求值 ^[7]		-	-	-	≤15	≤5	≤2

规范要求要求在 0 °C 时 CTOD 值应不小于 0.2 mm。中海金洲对 X65 钢级 $\Phi 406.4 \text{ mm} \times 14.3 \text{ mm}$ 海底管线钢管的管体和焊缝进行了 CTOD 试验, 结果表明: 在试验温度为 -15 °C 时, 管体的 CTOD 值在 0.6~1.0 mm 之间基本保持平稳波动; 而焊缝的 CTOD 值波动较大, 但均满足标准要求; 说明此钢管具有良好的抗开裂能力, 试验结果如图 3 所示。

图3 X65 钢级 $\Phi 406.4 \text{ mm} \times 14.3 \text{ mm}$ 海底管线钢管的管体和焊缝的 CTOD 值

4 海底管线钢管的质量稳定性和保障体系

对海底管线钢管的质量要求高于陆地管线^[8], 在 DNV-OS-F101—2005 规范和 API Spec 5L 管线钢管规范中明确规定了对 HFW 钢管制造工艺的要求: 一是 HFW 钢管所用钢卷应采用连铸坯或压力铸造厚板坯轧制; 二是 HFW 钢管制造用的钢带或钢板在对其边缘进行剪切、铣削或机械加工后应立即进行焊接, 对板带宽度方向要求进行连续检测; 三是对 HFW 钢管进行全管体探伤或对所用板材进行 100% 探伤。此外, 对 HFW 钢管生产线设备能力也提出了更高的要求——在对钢带或钢板的

边缘进行剪切、铣削或机械加工后能立即进行焊接。要达到此要求, 最好的办法是采用在线铣边技术^[9]。如果采用常规的方法即先纵剪完成后再进行焊接, 就很难满足标准的要求。同时, 还要配备全管体超声波探伤设备或板材超声波探伤设备, 才能满足生产工艺要求。

海底管线用 HFW 钢管除了在制造工艺上有更高的要求外, 在理化性能的检测频次和检验项目上也有更高的要求。以拉伸试验为例, 陆地用 HFW 钢管以不多于 100 根钢管为一个试验单元, 但海底管线用钢管的检测频次为不多于 50 根钢管为一个试验单元, 且要求管体纵向拉伸试验包括屈服强度、抗拉强度和伸长率。另外, 在海底管线用 HFW 钢管首批检验时要求进行全焊缝拉伸试验, 且当厚度大于 13 mm 时还要求进行 CTOD 试验。

为了保障海底管线钢管的质量, 必须要有严格的检验流程才能保障质量的稳定性^[10]。

中海金洲 HFW 钢管生产线控制管工艺路线设置的专职检验站点流程如下: 原料入厂复验→在线板材超声波检验→焊缝在线超声波检验→定径外观尺寸检验→钢管水压试验→水压试验后焊缝自动化超声波检验→管端坡口磁粉检验→钢管外观尺寸终检→钢管入库抽检→钢管发货检验。

为了提高产品的检验质量, 实施“三检制”, 即操作者自行检验、上下工序互相检验和质量检验中心专项检验。通过产品质量“三检制”控制流程, 进一步加强产品的检验质量。同时建有质量数据库, 具有质量数据录入和查询系统。此系统包括了原料和产品针对项目合同号的所有检验和试验数据, 以钢管管号和原料炉号、钢卷号为跟踪依据实施全程质量追溯。通过数据库管理实现每根合格入库的钢管必须经过所有的检验环节才能入库, 有效地保障了钢管的检验质量。

5 结 语

HFW 钢管逐步应用于海洋环境和酸性环境,对HFW 钢管焊缝的耐腐蚀性能和质量稳定性仍需作进一步的研究^[11]。以下措施有助于提高焊缝的耐腐蚀性能和质量稳定性:① HFW 钢管使用的钢卷要具有更低的 S 含量,降低夹杂物附近 S 的聚集,从而减少沟槽腐蚀的产生;②焊缝正火热处理工艺和淬火+回火热处理工艺对焊缝抗 HIC 腐蚀性能明显不同,焊缝经淬火+回火热处理工艺后抗 HIC 腐蚀性能更佳。此外,为了保障 HFW 钢管焊缝质量,很多技术,尤其是焊接自动化控制监测技术和无损检测技术还需要研发;海底管线钢管的质量稳定性还需要有严格的检验流程和可追溯系统,以保障每根钢管都经过每个检验环节并且是合格的。

6 参考文献

- [1] 吴凤梧. 国外高频直缝焊管生产[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985: 6-12.
- [2] 李鹤林, 郭生武, 冯耀荣, 等. 高强度微合金管线钢显微组织分析与鉴别图谱[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 10-13.
- [3] 胡松林. 高品质 HFW 管线管的制造与质量控制[J]. 钢管, 2008, 37(6): 44-49.
- [4] 胡松林. ERW 焊管的技术进步与产品结构调整[J]. 钢管, 2007, 36(5): 1-8.
- [5] 杨连河. X70 钢级 HFW 海底管线钢管的研制和开发[J]. 钢管, 2010, 39(1): 48-52.
- [6] 李景学. HFW 焊管焊接质量的影响因素分析及应对措施[J]. 焊管, 2011, 34(2): 54-57.
- [7] NACE International. NACE TM0284—2003 Standard test method evaluation of pipeline and pressure vessel steels for resistance to hydrogen-induced cracking[S]. Houston: NACE International Membership Services Department, 2003.
- [8] 胡松林. 海洋用厚壁 HFW 管线管的研发[J]. 钢管, 2012, 41(3): 28-32.
- [9] 王旭. 油气输送管线钢管制造与装备技术的现状及展望[J]. 钢管, 2012, 41(1): 7-13.
- [10] 张业圣. 海洋石油用管的发展现状和前景展望[J]. 钢管, 2009, 38(5): 1-10.
- [11] 王旭. HFW 钢管用于油气输送管道的问题思考及建议[J]. 钢管, 2013, 42(2): 48-50.

(收稿日期: 2012-11-01; 修定日期: 2013-05-10)

● 信 息

内蒙古包钢钢联股份有限公司 $\Phi 159$ mm PQF 连轧管机组成功生产出 P235GH 常规岛核电用无缝钢管

2013 年 4 月, 内蒙古包钢钢联股份有限公司 $\Phi 159$ mm PQF 连轧管机组成功生产出 P235GH 钢级, 4 种规格常规岛核电用无缝钢管 1 181 t, 这 4 种规格为: $\Phi 82.5$ mm \times 3.8 mm、 $\Phi 101.6$ mm \times 4.5 mm、 $\Phi 114.3$ mm \times 4.8 mm、 $\Phi 159$ mm \times 6.7 mm。P235GH 钢级常规岛核电用无缝钢管采用低碳当量, 低 P、S 的经济型碳锰钢, 复合添加 Al、V、Ti 等元素设计, 具有韧性好、焊接性能好的优点。经检验, 此次生产的产品的各项性能指标、外观质量都满足用户要求, 已出口德国。这标志着内蒙古包钢钢联股份有限公司市场竞争力不断增强, 又一产品走向国际市场。

(内蒙古包钢钢联股份有限公司 乔爱云)

渤海装备巨龙钢管有限公司的海底用 X65 钢级直缝埋弧焊管制造技术获国家专利授权

2013 年 4 月, 从国家知识产权局传来消息, 渤海装备巨龙钢管有限公司申请的“一种海底用 X65 管线钢直缝埋弧焊管制造方法”已获国家发明专利授权; 且运用该技术完成的科技项目荣获渤海石油装备制造有限公司科技进步特等奖、天津市科技进步三等奖和中国钢铁工业协会、中国金属学会冶金科学技术奖一等奖。

该技术已成功应用于我国首条深水天然气管线——南海深水天然气项目, 共销售 3 万余吨, 实现销售收入 28 970 万元。

(渤海装备华油钢管有限公司 闵祥玲)

作者: [杨连河](#), [高国军](#), [YANG Lianhe](#), [GAO Guojun](#)
作者单位: [中海石油金洲管道有限公司, 浙江湖州, 313000](#)
刊名: [钢管](#)
英文刊名: [Steel Pipe](#)
年, 卷(期): 2013, 42(3)

参考文献(11条)

1. 吴凤梧 [国外高频直缝焊管生产](#) 1985
2. 李鹤林;郭生武;冯耀荣 [高强度微合金管线钢显微组织分析与鉴别图谱](#) 2001
3. 胡松林 [高品质HFW管线管的制造与质量控制](#)[期刊论文]-[钢管](#) 2008(06)
4. 胡松林 [ERW焊管的技术进步与产品结构调整](#)[期刊论文]-[钢管](#) 2007(05)
5. 杨连河 [X70钢级HFW海底管线钢管的研制和开发](#)[期刊论文]-[钢管](#) 2010(01)
6. 李景学 [HFW焊管焊接质量的影响因素分析及应对措施](#)[期刊论文]-[焊管](#) 2011(02)
7. NACE International [NACE TM0284-2003 Standard test method evaluation of pipeline and pressure vessel steels for resistance to hydrogen-induced cracking](#) 2003
8. 胡松林 [海洋用厚壁HFW管线管的研发](#)[期刊论文]-[钢管](#) 2012(03)
9. 王旭 [油气输送管线钢管制造与装备技术的现状及展望](#)[期刊论文]-[钢管](#) 2012(01)
10. 张业圣 [海洋石油用管的发展现状和前景展望](#)[期刊论文]-[钢管](#) 2009(05)
11. 王旭 [HFW钢管用于油气输送管道的问题思考及建议](#)[期刊论文]-[钢管](#) 2013(02)

引用本文格式: [杨连河](#). [高国军](#). [YANG Lianhe](#). [GAO Guojun](#) [简析海洋环境用HFW钢管的质量控制](#)[期刊论文]-[钢管](#) 2013(3)