

# 海底用 $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温抗酸直缝埋弧焊管研制

赵与越, 赵波, 王斌

(中国石油集团渤海石油装备制造有限公司, 天津 300457)

**摘要:** 分析了国内某钢厂生产的 X65MOS 级钢板和所制的  $\Phi 762\text{ mm}\times 22.2\text{ mm}$  直缝埋弧焊钢管的力学性能、化学成分及显微组织等, 研究了用于国外某海底低温抗酸的 X65MOS 钢级  $\Phi 762\text{ mm}\times 22.2\text{ mm}$  直缝埋弧焊钢管及钢板理化性能, 从而系统地掌握了 X65MOS 钢级  $\Phi 762\text{ mm}\times 22.2\text{ mm}$  直缝埋弧焊钢管的制造能力。结果表明, 所研制的直缝埋弧焊管各项性能指标均达到国外某海底低温抗酸 X65MOS 钢级  $\Phi 762\text{ mm}\times 22.2\text{ mm}$  钢管的技术要求。同时, 母材和焊缝经抗氢致开裂试验后试样均无裂纹; 焊缝经抗硫化物应力腐蚀试验后试样没有裂纹, 表明钢管具有良好的耐硫化氢腐蚀性能。

**关键词:** 直缝埋弧焊钢管; X65MOS; 化学成分; 力学性能; 氢致开裂; 硫化物应力腐蚀

**DOI:**10.19938/j.steelpipe.1001-2311.2023.2.35.38

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Development of $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ Low Temperature and Acid Resistant SAWL Pipe for Submarine Service

ZHAO Yuyue, ZHAO Bo, WANG Bin

(CNPC Bohai Equipment Manufacturing Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

**Abstract:** Analyzed here in the paper are the mechanical properties, the chemical composition and the micro structure, etc. of the X65MOS steel plate and the  $\Phi 762\text{ mm}\times 22.2\text{ mm}$  SAWL weld pipe as made with the said plate both of which are produced by a certain domestic steel works. And both the physical and chemical properties of the said steel plate and weld pipe as to be used by a certain foreign user for low-temperature submarine service are studied so as to systematically grasp the manufacture ability of the said weld pipe. It is regarded via the analysis result that the said weld pipe as researched and developed has met applicable foreign technical requirements. Moreover the specimens of both the base metal and the weld show no cracks via the HIC test. Likely the weld proper also shows no cracks via the SSC test, which demonstrates that the steel weld pipe possesses good SSC resistance.

**Key words:** SAWL pipe; X65MOS; chemical composition; mechanical properties; HIC; SSC

随着海底油气田的开采, 海底油气输送管道已成为广泛用于海洋石油工业的重要运输手段<sup>[1-3]</sup>。海底管道通常埋入海底的泥土中或直接浸泡在海水中, 在高纬度地区的海底, 尤其是深水、超深水区域海底管道需要同时具备抗低温的性能和抗酸腐蚀性能。

针对国外某海底管道工程用油气输送管需求, 结合海底、低温、腐蚀的服役工况对该工程用管线钢和钢管的性能要求, 开发出具有良好的力学

性能、抗低温和耐酸性的 X65MOS 钢级、板厚 22.2 mm 管线钢钢板, 研制出具有抗低温和耐酸性的国产 X65MOS 钢级  $\Phi 762\text{ mm}\times 22.2\text{ mm}$  海底用直缝埋弧焊钢管。

### 1 海底低温抗酸管线钢钢板的开发

为了满足海底管道的服役条件, 海底管线钢除了要满足高强度、高韧性、良好的焊接性能和耐酸性能外, 还要满足以下特点: ①低的碳当量; ②低的 S、P 含量; ③高的形变强化指数; ④低的屈强比; ⑤优良的纵向拉伸性能; ⑥低的铸坯中心偏析, 良好的厚度方向性能, 低的断口分离和层状撕

赵与越(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事油气输送用钢管及生产工艺技术的研究工作。

裂的几率；⑦优异的夏比冲击、落锤撕裂和 CTOD (Crack-tip Opening Displacement, 裂纹尖端开口位移)性能<sup>[3-4]</sup>。根据以上设计思路,此次试制的 X65MOS 钢级管线钢钢板是采用低 C、Mn、Mo、Nb、Ni 系设计,适当添加 Cr 等微合金元素。在制

定技术条件时,对成分范围进行了更加严格的限定。研制开发的 X65MOS 钢级、板厚 22.2 mm 管线钢钢板的化学成分见表 1, X65MOS 钢级、板厚 22.2 mm 管线钢钢板力学性能见表 2, 钢板 1/2 处金相组织如图 1 所示。

表 1 X65MOS 钢级、板厚 22.2 mm 管线钢钢板化学成分(质量分数)

项目	C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Nb	$P_{cm}$
实测值	0.06	1.22	0.25	0.006	0.001	0.056	0.171	0.162	0.052	0.14
技术要求	≤0.10	≤1.60	≤0.45	≤0.015	≤0.002	≤0.15	≤0.30	≤0.30	≤0.08	≤0.22

表 2 X65MOS 钢级、板厚 22.2 mm 管线钢钢板力学性能

项目	强度/MPa		伸长率 A%	屈强比 <sup>①</sup>	-40 °C 冲击功/J	-30 °C DWTT <sup>②</sup> /%	硬度 HV10
	$R_{0.5}$	$R_m$					
实测值	484	548	56	0.88	425	100	160~199
技术要求	460~590	535~700	≥30	≤0.92	≥150	≥85	≤200

注: ① $R_{0.5}/R_m$ ; ②DWTT(Drop-weight Tear Test, 落锤撕裂试验)。

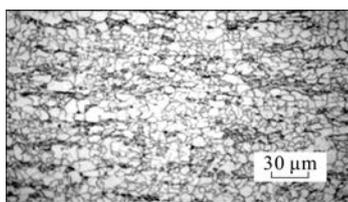


图 1 钢板 1/2 处金相组织

该项目所在海域的最低环境温度为 $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 根据 DNV-OS-F101—2013《海底管线系统规范》“表 6-4 C-Mn 钢管线管夏比 V 型缺口冲击试验温度”中规定,当钢板板厚  $20\text{ mm} < t \leq 40\text{ mm}$  时,冲击试验温度应比最低设计温度低  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 因此 22.2 mm 壁厚焊管的低温冲击试验温度应为 $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

从表 1~2 的数据可以看出研制开发的 X65MOS 钢级、板厚 22.2 mm 管线钢钢板化学成分、力学性能均满足技术要求,同时严格控制了 S、P 等有害元素的含量。从图 1 可见,该钢板具有良好的组织均匀性,主要组织为多边形铁素体+粒状贝氏体,该组织状态可以使材料具有优良的强韧性,对裂纹的扩展起到了阻碍作用,实现了对 DWTT 性能的有效控制<sup>[5]</sup>。

## 2 海底低温抗酸直缝埋弧焊管的开发

采用 JCO 成型工艺对研制开发的 X65MOS 钢级、板厚 22.2 mm 管线钢钢板进行钢管成型预焊,对成型预焊后的钢管进行多丝埋弧焊,对焊接成型后的钢管进行全管体扩径,将可能对材料性能产生

影响的扩径率波动控制在 0.2% 以内<sup>[6]</sup>。试制出具有抗低温和耐酸性的 X65MOS 钢级  $\Phi 762\text{ mm} \times 22.2\text{ mm}$  海底用直缝埋弧焊钢管<sup>[7-18]</sup>。对管体及焊接接头的力学性能、硬度及氢致开裂(Hydrogen-induced Cracking, HIC)和硫化物应力腐蚀(Sulfide Stress Corrosion Cracking, SSC)试验等方面进行了性能分析。

### 2.1 力学性能

钢管的拉伸性能统计结果见表 3。从表 3 可以看出钢管母材和焊缝均具有很好的拉伸性能,母材的横向屈服强度平均值为 505 MPa; 横向抗拉强度平均值为 572 MPa; 伸长率平均值为 53%; 屈强比平均值为 0.89; 母材的纵向屈服强度平均值为 517 MPa; 纵向抗拉强度平均值为 586 MPa; 伸长率平均值为 51%; 屈强比平均值为 0.88; 焊缝试样采用去除焊缝余高的圆棒试样,焊缝的抗拉强度平均值为 600 MPa。焊缝的抗拉强度高于母材的抗拉强度。试验结果符合用户技术条件的要求。

冲击功是衡量钢管止裂性能的关键指标,对 X65MOS 钢级  $\Phi 762\text{ mm} \times 22.2\text{ mm}$  直缝埋弧焊钢管焊缝、热影响区进行夏比冲击试验,试验温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,试验结果见表 4。从表 4 可以看出外焊缝冲击功平均值为 192 J; 内焊缝冲击功平均值为 88 J; 外焊缝热影响区冲击功平均值为 377 J; 内焊缝热影响区冲击功平均值为 354 J。试验结果均满足用户技术条件要求,说明钢管具有良好的冲击韧性。

对 X65MOS 钢级  $\Phi 762\text{ mm} \times 22.2\text{ mm}$  直缝埋弧

表 3 Φ762 mm×22.2 mm X65MOS 钢管的拉伸性能统计结果

项目	母材			焊缝		
	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率 A/%	屈强比	抗拉强度/MPa	断裂位置
横向	488~527	557~588	52~54	0.87~0.90	595~606	热影响区
纵向	479~541	568~625	48~53	0.87~0.90		
技术要求	450~600	535~760	≥24	≤0.90	≥535	-

表 4 X65MOS 钢管夏比冲击试验结果 J

项目	-40 °C 焊缝冲击功		-40 °C 热影响区冲击功		技术要求
	外	内	外	内	
最小值	151	43	265	314	≥38
最大值	242	141	417	409	
平均值	192	88	377	354	≥45

表 5 X65MOS 钢管-30 °C 落锤撕裂试验结果 %

项目	剪切面积百分比		
	最小值	最大值	平均值
实测值	84	98	90
技术要求	≥75		≥80

焊钢管进行落锤撕裂试验，试验结果见表 5。从试验数据可以看出，该钢管具有优良的 DWTT 性能，剪切面积百分比单个值均在 84% 以上，平均值均在 90% 以上，均达到了用户技术条件要求。

X65MOS 钢级 Φ762 mm×22.2 mm 直缝埋弧焊钢管硬度测试结果见表 6。从试验结果数据可以看出，母材最大硬度为 200 HV10，热影响区最大硬度为 194 HV10，焊缝最大硬度为 213 HV10，均达到了用户要求(≤240 HV10)，并有较大的裕量，同时在热影响区存在明显的软化。

表 6 Φ762 mm×22.2 mm X65MOS 钢管焊接接头的硬度测试结果 HV10

位置	母材	热影响区			焊缝			热影响区			母材
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	
外	200	164	180	191	205	213	211	193	179	165	191
中	186	171	183	194	198	210	205	191	193	194	172
内	200	181	180	179	208	197	202	189	184	177	193

X65MOS 钢级 Φ762 mm×22.2 mm 直缝埋弧焊钢管母材、焊缝和热影响区 CTOD 测试结果见表 7。从试验数据可以看出，母材、焊缝和热影响区的 CTOD 值均达到了用户技术条件要求。

表 7 X65MOS 钢管 CTOD 测试结果 mm

项目	母材			焊缝			热影响区		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
实测值	1.62	1.23	1.55	0.33	0.19	0.24	0.78	1.30	1.44

注：技术要求中-29 °C 的 CTOD 值 ≥0.15 mm。

样进行宏观检查，试样表面未发现氢鼓泡。对试样截面进行金相剖面，并在 100 倍显微镜下进行观察，管体及焊缝剖面均无裂纹，试验结果表明该钢管具有较好的抗氢致开裂性能。

在焊缝处的壁厚上、中、下部位制取抗硫化物应力腐蚀试样，试样尺寸为 25 mm×5 mm×130 mm，依据美国腐蚀工程师协会 NACE TM 0177—2016《金属在 H<sub>2</sub>S 环境中抗硫化物应力开裂和应力腐蚀开裂的实验室试验方法》(A 溶液)进行抗硫化物应力腐蚀试验，试验设备为四点弯曲试验装置，加载应力为 405 MPa，试样浸泡饱和 H<sub>2</sub>S 溶液 720 h 后，试样没有裂纹，试验结果表明该钢管具有较好的抗硫化物应力腐蚀能力。

## 2.2 腐蚀试验

在焊缝及距焊缝 90°、180°的管体母材处的壁厚上、中、下部位制取抗氢致开裂试样，试样尺寸为 20 mm×20 mm×100 mm，依据美国腐蚀工程师协会 NACE TM 0284—2016《管道和压力容器用钢抗氢致开裂性能评价的试验方法》(A 溶液)进行 HIC 试验，试样浸泡饱和 H<sub>2</sub>S 溶液 96 h 后，对试

## 3 结 论

(1) 通过研究分析，合理控制合金含量，添加适当的微合金元素以及优化的热机械控制(Thermo

Mechanical Control Process, TMCP)工艺, 可以开发出具有良好力学性能和耐腐蚀的海底用抗低温和耐酸性的 X65MOS 钢级、板厚 22.2 mm 管线钢钢板。

(2) 开发研制的 X65MOS 钢级  $\Phi 762$  mm $\times$ 22.2 mm 海底用直缝埋弧焊钢管在 $-40$  °C 试验温度下外焊缝冲击功平均值为 192 J, 内焊缝冲击功平均值为 88 J, 外侧热影响区冲击功平均值为 377 J, 内侧热影响区冲击功平均值为 354 J;  $-30$  °C 剪切面积百分比平均值达 90% 以上; 焊接接头的硬度均在 213 HV10 以下; 在 $-29$  °C 试验温度下, 母材、焊缝及热影响区的 CTOD 值均在 0.19 mm 以上。所有力学性能指标均符合用户技术条件的要求。

(3) 通过对试制的 X65MOS 钢级  $\Phi 762$  mm $\times$ 22.2 mm 海底用直缝埋弧焊钢管进行氢致开裂和硫化物应力腐蚀试验分析, 试验结果表明开发的 X65MOS 钢级  $\Phi 762$  mm $\times$ 22.2 mm 海底用直缝埋弧焊钢管具有良好的耐硫化氢腐蚀性能。

#### 4 参考文献

- [1] 王文立. 深水区和超深水油气勘探难点技术及发展趋势[J]. 中国石油勘探, 2010, 15(4): 71-75.
- [2] 周延东. 我国海底管道的发展状况与前景[J]. 焊管, 1998, 21(4): 46-48.
- [3] 毕宗岳, 牛爱军, 牛辉, 等. 深海油气输送用高强度厚壁抗硫海洋管开发[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2016, 28(6): 607-610.
- [4] 梁羽, 张文斌, 陈裕彬, 等. 深水海底管道的直缝埋弧焊钢管特点及 DWTT 性能影响因素分析[J]. 新技术新工艺, 2014(4): 102-105.
- [5] 赵贤平, 陈新慈, 杨陈莉, 等. 多边铁素体对 X70 管线钢 DWTT 性能影响分析[J]. 宽厚板, 2012, 18(2): 41-43.
- [6] 陈小伟, 嵇峰, 白雪伟, 等. 中俄东线 X80 钢级  $\Phi 1 422$  mm $\times$ 30.8 mm 钢管理化性能研究[J]. 焊管, 2019, 42(5): 10-17.
- [7] 王燕. 焊接材料对 X70 直缝埋弧焊管焊缝组织性能的影响[J]. 钢管, 2020, 49(3): 21-24.
- [8] 王燕. 直缝埋弧焊管焊缝性能不合格及点状缺陷产生原因[J]. 钢管, 2020, 49(4): 39-42.
- [9] 王林林, 杨鹏飞, 范洁, 等. 直缝埋弧焊管焊缝夏比冲击性能试验研究[J]. 钢管, 2021, 50(5): 5-13.
- [10] 闵祥玲, 王旭, 刘涛, 等. X70 钢级海洋用高应变直缝埋弧焊管的研制[J]. 钢管, 2021, 50(4): 34-38.
- [11] 王利树, 刘世泽, 魏少军, 等. 深海用直缝输气管线管的开发和应用[J]. 钢管, 2014, 43(2): 22-30.
- [12] 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(5): 1-10.
- [13] 胡松林. 海洋用厚壁 HFW 管线管的研发[J]. 钢管, 2012, 41(3): 28-32.
- [14] 徐亮, 刘世泽. 海洋管线管焊缝全壁厚试样与减薄试样的 CTOD 值分析[J]. 钢管, 2012, 41(1): 72-74.
- [15] 王斌, 黄继庆, 王佳, 等. 国内海底抗酸管研究成果和进展[J]. 钢管, 2020, 49(5): 8-14.
- [16] 赵与越, 庞贵良, 王强, 等.  $\Phi 1 422$  mm $\times$ 38.5 mm X80 钢管理化性能研究[J]. 钢管, 2020, 49(6): 52-56.
- [17] 徐亮, 梁才萌, 吴绍泉, 等. 深水海底用管管环压溃试验可行性分析[J]. 钢管, 2019, 48(5): 71-75.
- [18] 杨连河, 叶培荣, 李虎昌, 等. X70 钢级 HFW 海底管线钢管的研制和开发[J]. 钢管, 2010, 39(1): 48-52.

(收稿日期: 2022-04-22; 修定日期: 2022-09-23)

#### ● 简 讯

**衡阳华菱钢管有限公司钢管应用在 9 026 m 亚洲最深直井** [发布日期: 2023-03-13] 2023 年 2 月 13 日, 中国石油西南油气田公司位于蓬莱气区的蓬深 6 井顺利完钻并成功固井, 井深最深达到 9 026 m, 刷新亚洲最深直井纪录。衡阳华菱钢管有限公司(简称华菱衡钢)为其提供自主研发的非标规格高钢级第三代大直径厚壁气密封螺纹套管, 助力我国钻井装备和钻井技术总体达到世界先进水平。  
(摘自: 衡阳华菱钢管有限公司网站)

**天津钢管制造有限公司首次生产 TP-Q1000 射孔枪管** [发布日期: 2023-03-13] 近日, 天津钢管制造有限公司首次生产 TP-Q1000 钢级系列射孔枪管, 性能合格率一次达标, 相关生产技术指标全部一次满足用户要求。TP-Q1000 钢级系列射孔枪管性能指标要求极其严格, 需要精准匹配屈服强度与横向、纵向冲击功指标, 且采用新钢种, 生产难度大。

(摘自: TPCO 天管在线)