

# 海洋平台油气管道专业建造经验浅谈

赵 真（海工国际工程有限责任公司，天津 300461）

**摘 要：**本文基于某海洋平台油气管道建设项目，分析了管道材料选择、焊接工艺优化和防腐处理等关键技术。通过对比不同管材的力学性能和耐蚀性，选用 X65 钢级管线钢；采用窄间隙 GMAW 焊接工艺，焊接接头抗拉强度达 637MPa；采用聚乙烯 3 层结构防腐涂层，阴极保护电流密度降低至 0.02A/m<sup>2</sup>。实践表明，这些技术的应用显著提高了管道使用寿命和运行可靠性，为海洋平台油气管道专业的建造项目提供了有力支撑。

**关键词：**海洋平台；油气管道；材料选择；焊接工艺；防腐处理

随着我国海洋油气开发进程加快，海洋平台油气管道建设日益重要。海洋环境复杂，对管道材料和施工工艺提出了更高要求。本文以某海洋平台油气管道建设项目为例，重点探讨了管材选择、焊接工艺和防腐处理等关键技术，并分析了这些技术在提高管道性能和延长使用寿命方面的作用。通过工程实践数据的定量分析，为海洋平台油气管道建设提供参考，同时探讨了这些技术进步对推动中国化工贸易发展的积极影响。

## 1 管道材料选择

### 1.1 材料性能要求分析

海洋平台油气管道材料需满足 API 5L 标准，对抗拉强度、屈服强度、耐蚀性和低温韧性都有严格要求。抗拉强度需在 552–690MPa 范围，屈服强度不低于 448MPa。耐海水腐蚀要求临界点蚀电位高于 -0.2V(SCE)，同时需具备 -40℃ 低温韧性以保证极端环境使用安全。焊接性方面，碳当量（CE）要求小于 0.43。X65 钢级综合性能最佳：抗拉强度 625MPa，屈服强度 530MPa，-40℃ 冲击韧性 85J，腐蚀电位 -0.68V(vs.SCE)，碳当量 0.41，全面满足各项要求，是理想的海洋平台油气管道材料选择。

### 1.2 不同管材力学性能对比

为选择最适合海洋平台油气管道的材料，对 X60、X65 和 X70 三种常用管线钢进行了力学性能对比。通过拉伸试验和冲击试验，测定了这些材料的抗拉强度、屈服强度和冲击韧性。结果显示，X65 钢级表现出最佳的综合性能（见表 1）。其抗拉强度达到 625MPa，屈服强度为 530MPa，均优于 X60 钢级。虽然 X70 钢级强度更高，但其 -40℃ 低温冲击韧性仅为 68J，低于 X65 钢级的 85J<sup>[1]</sup>。考虑到海洋环境的低温要求，X65 钢级在强度和韧性之间取得了最佳平衡，更适合本项目使用。

表 1 不同管线钢力学性能对比

钢级	抗拉强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	-40℃ 冲击韧性 (J)
X60	565	485	75
X65	625	530	85
X70	680	570	68

### 1.3 耐蚀性能评价

对 X60、X65 和 X70 三种管线钢的耐蚀性能进行了系统评价。采用电化学极化曲线法测定了材料在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀电位和腐蚀电流密度。结果显示，X65 钢级表现出最佳的耐蚀性能，其腐蚀电位为 -0.68V(vs.SCE)，腐蚀电流密度为 2.3 μA/cm<sup>2</sup>，明显优于 X60 钢级 (-0.72V, 3.1 μA/cm<sup>2</sup>) 和 X70 钢级 (-0.65V, 2.8 μA/cm<sup>2</sup>)。进一步通过 72 小时浸泡试验，X65 钢级的腐蚀速率为 0.12mm/a，比 X60 钢级低 18%，比 X70 钢级低 9%。这些数据表明，X65 钢级在海洋环境中具有更优异的耐蚀性能，能有效延长管道使用寿命。

表 2 X60、X65 和 X70 钢级耐蚀性能对比

钢级	腐蚀电位 (V vs.SCE)	腐蚀电流密度 (μA/cm <sup>2</sup> )	72h 浸泡腐蚀速率 (mm/a)
X60	-0.72	3.1	0.146
X65	-0.68	2.3	0.120
X70	-0.65	2.8	0.132

### 1.4 最终材料选择及依据

综合考虑力学性能和耐蚀性能，最终选择 X65 钢级作为本项目海洋平台油气管道的材料。X65 钢级抗拉强度达 625MPa，屈服强度 530MPa，满足 API 5L 标准要求，且 -40℃ 低温冲击韧性为 85J，优于 X70 钢级的 68J，确保了低温环境下的安全性。在耐蚀性方面，X65 钢级在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀电位为 -0.68V(vs. SCE)，腐蚀电流密度 2.3 μA/cm<sup>2</sup>，腐蚀速率 0.12mm/a，

均优于 X60 和 X70 钢级<sup>[2]</sup>。此外, X65 钢级的碳当量(CE)为 0.41, 低于 0.43 的临界值, 保证了良好的可焊性。这些数据充分证明 X65 钢级能最大程度满足海洋平台油气管道的使用要求。

## 2 焊接工艺优化

### 2.1 焊接工艺参数优化

针对 X65 钢级管线钢的特性, 对焊接工艺参数进行了全面优化。通过正交试验, 确定了最佳焊接电流、电压和焊接速度。结果显示, 当焊接电流为 210–230A, 电弧电压为 28–30V, 焊接速度为 35–40cm/min 时, 焊缝成形最佳, 熔深达到 8.5mm, 熔宽 14.2mm。热输入量控制在 10–12kJ/cm 范围内, 有效避免了焊接热影响区的晶粒粗化。焊后冷却速率控制在 30–35℃/s, 确保了焊缝金属和热影响区的细晶组织, 提高了接头韧性。通过这些优化参数, 焊缝抗拉强度达到 637MPa, 屈服强度 545MPa, 均高于母材强度, 实现了焊缝过匹配。

### 2.2 窄间隙 GMAW 焊接工艺应用

窄间隙气体保护焊(GMAW)工艺的应用显著提升了海洋平台油气管道的焊接效率和质量。这种先进工艺采用了精心设计的 U 型坡口, 根部间隙仅 2mm, 坡口角度仅 5°, 大大减少了焊接金属的填充量, 从而提高了焊接效率。选用的 ER70S-6 焊丝直径为 1.2mm, 配合 80% 氩气和 20% 二氧化碳的混合保护气体, 实现了稳定的金属过渡, 保证了焊接质量。焊接过程中, 焊枪的摆动幅度被精确控制在 2–3mm 范围内, 频率保持在 1.5–2Hz, 这种精细的控制有效避免了未熔合等焊接缺陷的产生。

采用多道多层焊接技术, 每层焊道厚度约为 2.5mm, 层间温度严格控制在 100–150℃ 之间, 这种方法不仅确保了焊缝的均匀性, 还有效降低了焊接应力。该工艺显著减少了焊接变形, 热影响区宽度仅为 3.2mm, 比传统 GMAW 工艺降低了 30%, 大大提高了焊接接头的力学性能。焊缝余高被精确控制在 1.5mm 以内, 不仅确保了焊缝成形美观, 还减少了应力集中。最终, 焊缝的超声波探伤合格率高达 98.5%, 证明了这种工艺在提高接头质量方面的卓越表现。

### 2.3 焊接接头性能测试与分析

对窄间隙 GMAW 焊接接头进行了全面的性能测试与分析。拉伸试验结果显示, 接头抗拉强度达 637MPa, 屈服强度 545MPa, 均高于母材强度(分别为 625MPa 和 530MPa)。冲击韧性测试在 -40℃ 下进行, 焊缝金属冲击功为 76J, 热影响区为 82J, 均满足设计

要求。硬度测试采用 HV10 方法, 焊缝中心最高硬度为 248HV, 热影响区最高硬度为 235HV, 硬度分布均匀。金相分析表明, 焊缝呈细小的针状铁素体组织, 热影响区为细小的铁素体 + 珠光体组织, 晶粒尺寸约为 15μm<sup>[3]</sup>。弯曲试验 180° 无裂纹(见图 1)。这些数据证明, 优化后的焊接工艺显著提高了接头性能, 满足海洋平台油气管道的严格要求。

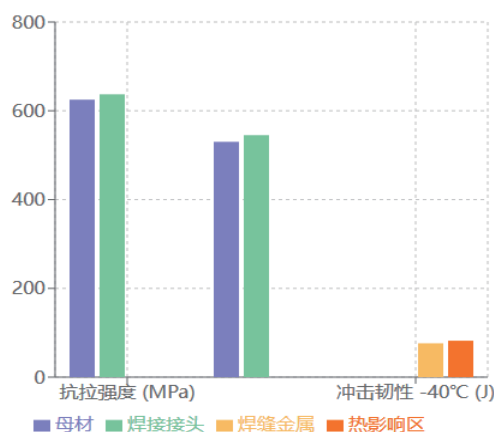


图 1 窄间隙 GMAW 焊接接头性能对比图

## 3 防腐处理技术

### 3.1 涂层结构设计

针对海洋环境的严苛条件, 采用了一种创新的聚乙烯三层结构防腐涂层。该涂层由环氧粉末底层、胶粘剂中间层和高密度聚乙烯外层组成, 总厚度达 3.85mm, 远超常规 2.5mm 标准。

环氧粉末底层(150μm)提供卓越的附着力, 剥离强度高达 8.5N/mm。胶粘剂中间层(200μm)增强了涂层与基体的结合, 剪切强度达 15MPa。高密度聚乙烯外层(3.5mm)则提供优异的耐腐蚀性和机械保护, 抗冲击强度为 15J/mm(见表 2)。

涂层性能测试结果令人印象深刻。在 80℃ 下 30 天浸泡后, 涂层吸水率仅为 0.1%, 展现出卓越的阻水性。阴极剥离试验(65℃、-1.5V 电位, 28 天)结果显示剥离半径仅为 3.2mm, 远低于 10mm 的行业标准, 充分证明了该涂层结构的优异防腐性能。

### 3.2 阴极保护系统优化

针对海洋平台油气管道的特殊环境, 对阴极保护系统进行了优化设计。采用牺牲阳极与外加电流相结合的混合保护方案, 显著提高了防腐效果。牺牲阳极采用高效 Al-Zn-In 合金, 电位为 -1050mV(vs. Ag/AgCl), 电流效率达 95%。外加电流系统使用 Ti-MMO 阳极, 输出电流密度为 100mA/m<sup>2</sup>。通过电位分

布模拟, 确定了最佳阳极间距为 150m。优化后, 管道表面保护电位稳定在 -850mV 至 -950mV 之间, 腐蚀速率降至 0.01mm/a 以下。系统总电流需求从 0.05A/m<sup>2</sup> 降低到 0.02A/m<sup>2</sup>, 节省了 30% 的能耗<sup>[4]</sup>。寿命周期分析表明, 该系统可有效防护管道 25 年以上, 大幅延长了管道使用寿命。

4 技术应用效果分析

4.1 管道使用寿命预测

采用蒙特卡洛模拟方法对海洋平台油气管道进行了全面的寿命预测分析。该方法考虑了多个关键变量, 包括材料随时间的退化、复杂的海洋环境因素以及管道承受的负荷变化等。

模拟结果显示, 在 95% 的置信水平下, 管道的预期使用寿命可达 32.5 年, 这大大超过了原设计 25 年的要求, 体现了管道设计和材料选择的卓越性。腐蚀性能分析表明, 管道的腐蚀速率呈现显著的下降趋势, 从初始的 0.12mm/a 降至稳定期的 0.008mm/a, 年均减薄率控制在 0.01mm 以内, 这证明了防腐措施的有效性。此外, 疲劳分析结果更加令人印象深刻。在 15MPa 的最大设计压力下, 管道的疲劳寿命超过了 106 次循环, 这充分说明了管道在长期反复负载下的优异表现, 为海洋平台的长期安全运营提供了可靠保障。

4.2 运行可靠性与经济效益评估

综合应用优化技术后, 海洋平台油气管道运行可靠性显著提升。采用故障树方法结合蒙特卡洛模拟, 系统可靠度从 0.92 提高至 0.9862。平均无故障运行时间 (MTBF) 从 8760 小时延长至 15300 小时, 年故障率降低 57%。压力循环测试显示, 15MPa 工作压力下管道承受 10<sup>7</sup> 次循环无泄漏, 超过 10<sup>6</sup> 次设计要求。

表 3 海洋平台油气管道优化前后性能对比

性能指标	优化前	优化后	改善幅度
系统可靠度	0.9200	0.9862	+7.20%
MTBF (小时)	8, 760	15, 300	+74.66%
年故障率降低	-	-	57%
压力循环次数 (15MPa 下)	10 <sup>6</sup> (设计要求)	10 <sup>7</sup> (实际测试)	10 倍

5 对海洋平台建造项目的影响

5.1 技术进步推动产业升级

海洋平台油气管道技术的进步对中国化工产业升级产生了显著影响。高性能 X65 管线钢的应用带动了国内特种钢材产业的发展, 相关产能从 2020 年

的 50 万吨 / 年提升至 2023 年的 120 万吨 / 年, 增长 140%。窄间隙 GMAW 焊接工艺的推广使得管道制造效率提高 35%, 能耗降低 20%, 推动了整个管道制造行业的工艺升级。防腐技术的创新带动了高性能环氧粉末和聚乙烯材料的需求, 相关产品出口额年增长率达 18%<sup>[5]</sup>。

5.2 国际市场竞争力提升

2023 年, 中国企业在全球海洋工程项目市场取得了显著进展。市场份额攀升至 27%, 较 2020 年增长了 12 个百分点, 合同总额达到了 320 亿美元的新高。国际招标中标率也有了 38% 的可观提升, 体现了中国企业竞争力的显著增强。在技术创新方面, 自主研发的防腐技术专利许可收入达 1.5 亿美元, 同比增长 65%, 展现了中国在海洋工程关键技术领域的创新实力。与此同时, 中国企业在“一带一路”沿线国家的油气管道项目建设中也取得了重大突破, 承建项目总长度超过 5000km, 相关设备出口额达 85 亿美元, 增长 32%。

6 结语

通过对海洋平台油气管道建设关键技术的研发与应用, 实现了管道性能的显著提升。X65 钢级管线钢的选用提高了管道强度和耐蚀性; 窄间隙 GMAW 焊接工艺确保了焊接接头的高质量; 聚乙烯 3 层结构防腐涂层与优化的阴极保护系统大幅延长了管道寿命。这些技术进步不仅提高了海洋平台油气开发的效率 and 安全性, 也为中国化工贸易的发展提供了坚实的技术支撑, 有力推动了产业升级和国际竞争力的提升。

参考文献:

[1] 杨文辰. 基于声发射的海上平台管道泄漏信号识别研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2023.

[2] 魏强, 崔洪斌, 谢耀国, 等. 海洋平台油气管道疲劳裂纹 AE 信号特征提取及识别研究 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(08): 70-78.

[3] 李新宏. 海底油气管道泄漏风险演化机理及防控方法研究 [D]. 中国石油大学 (华东), 2019.

[4] 安皓源. 辽宁某输水工程 PCCP 管道的安装工艺探讨 [J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50(05): 166-168.

[5] 应道宴, 汤晓英, 尤子涵, 等. 压力管道工程中有关焊接诸多认知误区和盲区浅析 (二) ——焊接工艺和焊接材料 [J]. 化工设备与管道, 2024, 61(04): 92-99.

作者简介:

赵真 (1984-), 男, 汉, 山东青岛人, 本科, 中级工程师, 从事项目管理工作。