

# 注水海底管道延寿评估研究

崔建国 于俊峰 (中石化胜利油田分公司海洋采油厂, 山东 东营 257237)

尹文涛 刘燕英 (天津赛文海工科技有限公司, 天津 300384)

**摘要:** 本文针对已达到设计使用寿命的注水海底管道, 通过分析管道现状、风险辨识、腐蚀速率计算、局部/整体结构强度计算、立管段疲劳计算等多方面建立注水海管的延寿评估模型。结合工程案例进行了实践分析, 判断能否满足延期服役使用的要求, 并基于评估结果, 提出了针对性的延寿策略和维护建议, 为注水海底管道的安全运行和寿命延长提供了科学依据和技术支持。

**关键词:** 海底管道; 注水海管; 设计使用寿命; 延寿评估

## 0 引言

随着海洋石油资源的不断开发, 注水海底管道作为重要的输水设施, 在油田开发中发挥着关键作用。然而, 许多早期建设的海底管道已达到或接近设计使用寿命, 面临着退役或延寿的抉择。直接更换新管道成本高昂, 且可能影响油田正常生产。因此, 对已达到设计使用寿命的注水海底管道进行科学评估, 确定其延寿可行性, 具有重要的经济和安全意义。本研究旨在建立一套完整的注水海底管道延寿评估体系, 包括评估方法、内容和决策, 为实际工程提供理论指导和技术支持。通过案例分析, 验证评估方法的可行性和有效性, 为类似海底管道的延寿决策提供参考。

## 1 注水海底管道现状分析

注水海底管道是连接海上平台与陆地注水设施的重要通道, 主要用于输送处理后的海水或地层水, 以维持油层压力, 提高原油采收率。这类管道通常由碳钢或耐腐蚀合金制成, 外部配有防腐涂层和混凝土配重层, 以适应复杂的海洋环境。主要考虑因素包括材料性能、腐蚀速率、疲劳损伤和外部环境影响等, 其使用寿命通常为 20–30 年。设计时采用的安全系数和腐蚀裕量也为管道延寿提供了潜在可能。然而, 随着使用年限的增加, 管道可能面临内外腐蚀、机械损伤、涂层老化等问题, 影响其安全性和可靠性。目前, 国内外对达到设计使用寿命的海底管道主要采取三种处理方式: 直接更换、退役废弃或延寿使用。直接更换成本高昂, 且可能影响油田正常生产; 退役废弃则可能造成资源浪费和环境风险。因此, 在确保安全的前提下, 对管道进行科学评估并适当延长使用寿命, 成为最具经济效益的选择。

## 2 延寿评估方法与标准

注水海底管道延寿评估需要采用多种方法, 全面

了解管道的物理状态和性能, 评估管道的承载能力和安全裕量。包括: 风险辨识 (综合考虑管道失效可能性和后果, 为延寿决策提供依据)、水击压力计算 (水击压力过高引起水泵、阀门和管道破坏, 或者压力过低导致失稳而破坏)、腐蚀速率计算 (综合内检测数据比法、腐蚀模型预测法、腐蚀挂片法、壁厚测量法进行比对计算, 得到最大腐蚀速率及均匀腐蚀速率)、局部强度分析 (综合许用应力法计算失效压力、弯矩、轴向力进行强度校核)、海底环境影响评估 (综合悬跨分析、稳定性分析, 全面、精确地评估海底环境的潜在影响)、整体强度分析 (综合爆裂校核、压溃校核、膨胀分析、地震分析、组合载荷校核分析评估海管当前的整体强度和剩余寿命)、立管疲劳分析 (综合涡激振动导致的疲劳、周期性波浪载荷导致的疲劳, 分析海管立管段情况)<sup>[1]</sup>。

延寿评估需要遵循相关标准和规范, 如 API 579、DNV-RP-F101、DNV-RP-F105 等国际标准, 以及 GB/T 29166、SY/T 6477、SY/T 10048 等国内标准<sup>[2]</sup>。这些标准为评估方法的选择、数据的采集和分析、评估结果的判定等提供了指导。同时, 还需要考虑管道的实际运行环境、历史数据和未来使用要求, 制定适合的评估方案。

## 3 延寿评估内容

### 3.1 数据采集

评估需要采集的数据主要包括: 环境参数、设计参数、监测检测参数、其他相关数据。环境参数包括: 水深参数、潮汐参数、海浪参数、海流参数、空气和海水温度、海水性质参数、土壤参数等; 设计参数包括: 管道结构、外径、壁厚、长度、输送介质、材料等级、屈服强度、拉伸强度、腐蚀裕量、制造工艺、建成日期、设计寿命、设计压力、设计流量、分段截面数据

等；监测检测参数包括压力、温度、流量等运行数据与介质化验数据、路由复测数据、内检测作业数据；其他相关数据包括：化学药剂使用情况、管道隆起情况、管道试压情况。通过对多维度数据的分析与整合，为整体延寿评估提供充足的信息基础，为制定更加精准的延寿策略和措施提供科学依据。

### 3.2 风险辨识

通过对国内外海底管道失效事故原因研究,金属损失、第三方破坏、自然力破坏是海底管道失效的主要原因。此外、疲劳老化和误操作也是海底管道失效的原因。可以通过内腐蚀因素( $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 等腐蚀性介质含量)、外腐蚀海洋腐蚀环境影响(海洋大气区、浪花飞溅区、潮差区、海水全浸区和海泥区五个腐蚀区带腐蚀峰值)、海底冲刷风险(水流速度和水流方向及海床特性)、第三方破坏风险(渔业活动、海上工程施工情况)等方面进行分段分析,对重点管段进行后续计算分析(如图1)。

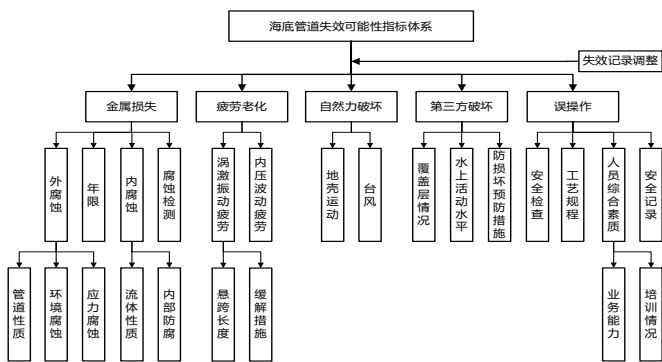


图 1

### 3.3 水击压力计算

对管道的水击压力可按照公式

$$\Delta H = \frac{a}{g} \Delta v = \frac{a}{g} (v_0 - v),$$

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho \left(1 + \frac{Kd}{E\delta}\right)}},$$

(来自《海洋石油工程设计指南》第五册海底管道设计)进行计算。式中 水击波传播速度, m/s; 瞬时中断液流引起的压头增值, m; 重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ; 水击前的流速, m/s; 瞬时变化后的流速, m/s; 液体密度,  $\text{kg/m}^3$ ; 液体的体积弹性系数, Pa; 管材弹性模量, m; 管壁厚度,  $\text{m}$ 。

### 3.4 腐蚀速率计算

①根据内检测报告,查清管道的腐蚀点个数、深

度、裂纹等缺陷情况，得出最大局部缺陷腐蚀速率；②对立管段取样进行腐蚀分析，找到局部腐蚀速率最大值；③使用 WG Intetech 公司开发的 ECE5 软件对海底管道进行内腐蚀速率分析及预测，得到均匀腐蚀参考速率；④腐蚀挂片法：把与管材或设备相同材质的金属试片放到介质中，通过计算试片暴露天数下的重量损失，计算均匀腐蚀速率；通过测量最深点蚀深度计算局部腐蚀速率；⑤壁厚测量法：根据管道原始壁厚减当前测量壁厚的值除以管道使用年限可以进行线性计算。

### 3.5 局部强度计算

采用 DNV-GL-RP F101 Part A- 抗力系数法对检测出的缺陷的长度与宽度进行了多数据分析, 得到最大腐蚀区长度和宽度。根据管道操作压力加上水击压力、最高运行温度温度计算管道轴向力, 根据管道最大弯曲半径计算管道弯矩。综合轴向力及弯矩, 计算目标腐蚀区的最大允许操作压力, 及根据腐蚀速率判断未来 5 年内管道最大允许操作压力。判断 2 次计算的压力是否满足管道最小允许操作压力。再结合最大允许壁厚减薄 80%, 计算管道最大允许使用寿命<sup>[3]</sup>。

### 3.6 环境影响

①依据 DNV-GL-RP-F105 (2017) 对管道的许用悬跨长度进行了计算, 分别计算操作工况下满足 VIV 监测的许用悬跨长度、满足疲劳监测的悬跨长度以及满足极限状态应力校核的许用悬跨长度, 取其中的最小值为该条管道最终的许用悬跨长度。判断计算出的管道悬跨长度是否超过许用悬跨; ②从横向稳定性校核及垂向稳定性校核两方面进行稳定性评估验证, 判断其同时满足上浮稳定性和下沉稳定性校核。

### 3.7 整体强度

①进行膨胀分析,判断操作和安装的温度差异引起的应变以及内部和外部的压力差异引起的应变是否满足经计算得到海管内管的弯矩;②分别计算地震引起的轴向应变、地震引起的轴向应力、地震引起的轴向力;③按照 DNV-GL-ST-F101 规范的要求,进行位载荷控制和移控制两种组合载荷校核,取最大腐蚀速率,计算满足载荷的极限壁厚。通过剩余壁厚与极限壁厚的差值及腐蚀速率计算剩余寿命<sup>[4]</sup>。

### 3.8 立管疲劳

通过 1 年、10 年、100 年的波高、跨零周期、波浪概率, S-N 曲线参数、应力幅应力幅 Weibull 分布形状参数  $h$ 、损伤安全系数  $\eta$ , 计算年化疲劳累计损伤,

表 1

设计寿命（年）	建设日期	设计长度（km）	实际长度（km）	路由复勘时间	立管探摸时间	管径（mm）
25	1999/08/26	1.2138	1.0782	2013 年 2016 年 2019 年 2022 年	2015 年 2018 年 2020 年 2022 年	89
容积（m <sup>3</sup> ）	壁厚（mm）	材质	运行状况	设计压力（MPa）	实际压力（MPa）	
18.68	9	X56	正常	16	8.6	

判断立管段疲劳对整条管道的服役寿命的影响。

4 案例分析

以胜利渤海某海上油田注水海底管道为例，（如表 1 所示）

该管道已运行 26 年，已过设计使用寿命，对其进行延寿评估。通过内检测、管段挂片测试、立管管段取样腐蚀分析得到腐蚀速率 0.24mm/a 作为最大腐蚀速率参与计算，采用 ECE 腐蚀模型计算的内腐蚀速率 0.17mm/a 作为均匀腐蚀速率参与计算。

基于 DNV-GL-RP-F101 规范中的 Part A 标准（抗力系数法），对示例海底注水管道的局部强度进行了分析。综合对当前管道 2024 年和未来 5 年（2029）的局部强度及服役适用性进行了分析，得到管道最保守的剩余寿命为 5 年、安全工作压力 19MPa 以上。

基于 DNV-GL-RP-F105（2017）对管道的许用悬跨长度进行了计算，得到当前管道的许用悬跨长度 2.75m，该海底注水管道 2020 年路由勘测显示该管道悬跨为 11.3m，结果显示，管道部分悬跨长度超过许用悬跨，存在一定风险。建议对这部分悬跨位置进行处理或加强监测。采用 DNV-GL-RP-F109（2017）对管道垂向稳定性进行分析，分别计算上浮稳定性和下沉稳定性，计算结果表明，垂向稳定性均通过校核。

基于 DNV-GL-ST-F101 对均匀腐蚀情况下的管道强度进行了内部压力校核与组合载荷校核，得到了海管的最小极限壁厚。其中内压爆裂需要的壁厚最大为 3.24mm。2024 年该海底注水管道剩余壁厚为 4.75mm，大于各工况所需的极限壁厚 3.24mm，因此可以认为目前管道具有较大的安全裕量。考虑均匀腐蚀速率为 0.17mm/a，5 年后（2029 年）该管道剩余壁厚为 3.9mm，大于各工况所需的极限壁厚 3.24mm，该管道满足继续服役使用 5 年的要求。依据整体计算工况，考虑均匀腐蚀速率为 0.17mm/a，从 2024 年算，该海底注水

管道的剩余寿命为 8.9 年。

基于评估结果，不考虑缓蚀剂作用，减薄至各工况所需的极限壁厚时间为 8.9 年，即剩余寿命为 8.9 年，满足管道完整性管理的要求。延寿方案包括定期、长期对海底管道输送介质进行检测，定期开展管道内检测，对管道悬跨情况持续监测。进行延寿评估后，选择决定继续投产使用，该管道目前运行状况良好，监测数据表明腐蚀速率稳定，同时未发现新的严重缺陷。该案例表明，科学的延寿评估和决策能够有效延长海底管道的使用寿命，带来显著的经济效益。

5 结论

对已达到设计使用寿命的注水海底管道进行延寿评估是保障管道继续投产安全运行的重要手段。通过科学的评估方法，合理分析海底管道的运行状况，结合先进的技术手段，可以为管道的延寿决策提供重要依据。基于完整性管理、风险评估和寿命预测的决策方法，使得延寿决策的科学性更高，能够实现风险与效益的平衡，同时合理的延寿方案可以有效延长海底管道的使用寿命，带来显著的经济效益。随着技术的不断进步，延寿评估方法将进一步优化，为海底管道的安全运行和资源的可持续利用提供强有力的支持。

参考文献：

[1] 张东卫,李庆,夏日长,孙祥杰,马坤明.海底管道延寿评估现状及关键要素探讨[J].石油和化工设备,2022,25(09).

[2] 陶成军,田利男,周小勇.管道延长寿命国际标准先进性分析[J].油气田地面工程,2016(10).

[3] 李秀美,陈国明,朱红卫.老龄油气管道安全寿命综合评估方法研究[J].工业安全与环保,2016(8).

[4] 闫相祯,刘锦昆,许志倩,杨秀娟.服役海底管道钢疲劳可靠性试验与海底管道寿命预测[J].中国石油大学学报(自然科学版),2010(05).