

# 海上油田返排作业期间腐蚀影响分析及控制措施研究

张曼杰<sup>1</sup> 刘涛<sup>2</sup>

1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518054

2. 中海油(天津)油田化工有限公司, 广东 深圳 518054

**摘要:** 针对海上油田井下作业返排期间面临的严重腐蚀问题, 通过现场监测与室内模拟实验, 系统研究了返排液对生产系统的腐蚀影响规律, 并评价了相应的控制措施。结果表明: 返排液具有强腐蚀性, 其基础腐蚀速率高达 0.4638 mm/a, 且硫酸盐还原菌(SRB)浓度 $\geq 110000$ 个/mL; 缓蚀剂浓度由 15ppm 提升至 30ppm 后, 腐蚀速率可降至 0.0365mm/a; 海底管道采用双倍缓蚀剂预膜技术, 腐蚀速率可由 0.1697mm/a 显著降至 0.0644mm/a。基于研究结果, 建立了以“动态加药-优化清管-全过程监测”为核心的综合控制措施, 为海上油田返排作业期间的腐蚀防控提供了有效解决方案。

**关键词:** 海上油田; 返排液; 腐蚀控制; 缓蚀剂; 硫酸盐还原菌; 清管作业

## 引言

在海上油田开发过程中, 井下作业是维持油田稳产的重要措施, 而作业后的返排过程往往会将大量高腐蚀性介质引入生产系统<sup>[1]</sup>。返排液通常含有残余的完井液、地层水、钻井液添加剂以及作业过程中产生的腐蚀产物, 具有成分复杂、矿化度高、微生物含量丰富等特点<sup>[2]</sup>。这些介质通过闭排系统进入主生产工艺流程, 显著改变了原有的腐蚀环境, 导致设备及管线的腐蚀风险急剧上升。

海上油田在生产过程中同样面临严峻的返排期腐蚀挑战。与常规采出液相比, 返排液在离子组成、微生物活性及固相含量等方面存在显著差异, 使得基于常规工况建立的腐蚀控制策略往往难以达到理想效果<sup>[3]</sup>。特别是在返排液汇入闭排罐并周期性回注至生产流程的特殊工况下, 腐蚀问题更加复杂<sup>[4]</sup>。目前, 针对海上油田返排期间全流程腐蚀影响规律及控制措施的系统研究尚不充分。

为此, 本研究以南海某油田返排作业为研究对象, 通过现场监测与室内实验相结合的方法, 旨在: (1) 揭示返排液对自闭排罐至下游海管、处理设施的腐蚀影响规律; (2) 明确缓蚀剂在返排液介质中的适用浓度与作用效果; (3) 建立一套适用于海上油田返排期间的综合控制措施, 为现场腐蚀管控提供技术支持。

## 1 实验部分

### 1.1 研究对象与工况

研究对象为南海某油田返排期间的闭排系统及其下游

流程。返排液主要来源于井下作业后的单井返排, 经闭排罐收集后周期性回注至生产流程。闭排罐容积约 200m<sup>3</sup>, 常温常压运行, 回注频率在正常工况下为 2-3 天/次, 返排期间缩短至 1 天/次。现场采用在闭排罐入口连续加注 100ppm 杀菌剂的基础控制措施。

### 1.2 实验方法

实验介质为返排期间采集的闭排罐水样与生产水按体积比 1:1 混合。采用动态腐蚀模拟装置(旋转挂片仪)模拟现场流速条件(1.5m/s), 温度与压力分别控制为 85℃和 1.6MPa, 以复现关键管段的服役环境。

实验设置空白对照组、缓蚀剂 15ppm 组与缓蚀剂 30ppm 组进行对比, 每组实验平行 3 次。采用失重法测定平均腐蚀速率, 利用扫描电子显微镜(SEM)观察挂片表面形貌, 并通过电化学测试分析缓蚀剂的作用机制。

### 1.3 分析与表征

返排期间定期采集闭排罐、生产分离器及海管出口水样, 检测 pH 值、总铁浓度、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度及 SRB/TGB 菌含量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 返排液腐蚀特性分析

返排液表现出独特的强腐蚀性特征(见表 1)。其总铁浓度高达 37.2mg/L, 远高于常规生产水, 表明返排过程中金属材料发生了严重腐蚀; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度超过 800 mg/L, 既增加了结垢倾向, 也为 SRB 代谢提供了充足环境。微生物分析显示 SRB 浓度高达 $\geq 110000$ 个/mL(35℃培养), 构成了

极高的微生物腐蚀风险。

表 1 返排液主要腐蚀因子分析

腐蚀因子	浓度 / 范围	潜在腐蚀风险
pH 值	6.70 ~ 6.82	弱酸性环境, 促进电化学腐蚀
总铁 / (mg · L <sup>-1</sup> )	12.7 ~ 37.2	指示持续腐蚀, 易形成沉积物
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / (mg · L <sup>-1</sup> )	610 ~ 800	结垢倾向, 为 SRB 代谢提供底物
SRB / (个 · mL <sup>-1</sup> )	≥ 110000 (35℃ 培养)	极高微生物腐蚀风险

### 2.2 返排液对生产系统与海管系统的腐蚀影响

返排液回注对生产分离器造成了显著的腐蚀影响。从图 1 可见, 处理含返排液的分离器, 其腐蚀速率 (0.2423mm/a) 是处理常规物流的分离器 (0.1059mm/a) 的 2.3 倍。这表明返排液的高腐蚀性直接提升了流程设备的整体腐蚀风险。

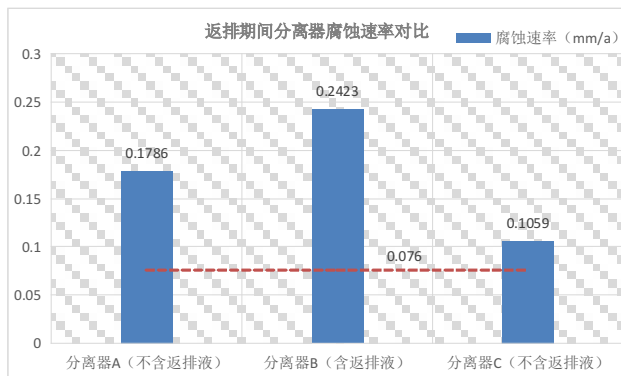


图 1 返排期间分离器腐蚀速率对比 (含返排液 vs 常规物流)

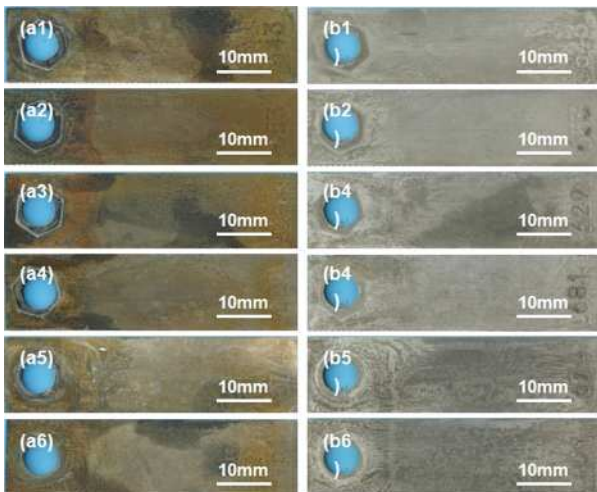


图 2 返排期间分离器腐蚀挂片形貌 (编号 a 为酸洗前, 编号 b 为酸洗后)

腐蚀形貌分析表明, 受返排液影响的分离器内壁更易出现点蚀。这主要源于返排液中高浓度 Cl<sup>-</sup> 与 SRB 的协同作用: Cl<sup>-</sup> 破坏碳钢表面氧化膜的完整性, SRB 则在局部形

成厌氧酸性微环境, 加速点蚀坑的形核与扩展<sup>[5]</sup>。

返排液进入海管后, 显著加剧了管线的腐蚀 (见图 2)。腐蚀模拟实验显示, 含返排液时海管腐蚀速率达 0.1697mm/a ~ 0.2003mm/a, 均为常规物流 (0.0734mm/a) 的 2.7 倍以上。返排期间海管出口 H<sub>2</sub>S 浓度显著升高至 40 ~ 60ppm, 形成了典型的酸性多相流腐蚀环境。

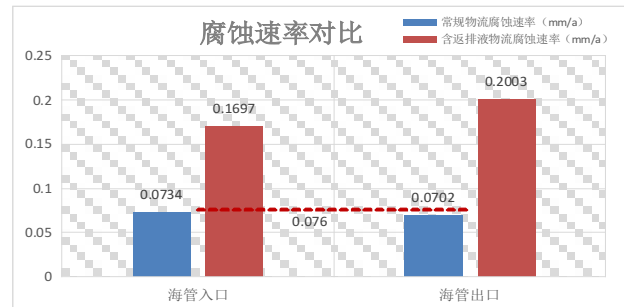


图 3 返排期间海管腐蚀速率对比

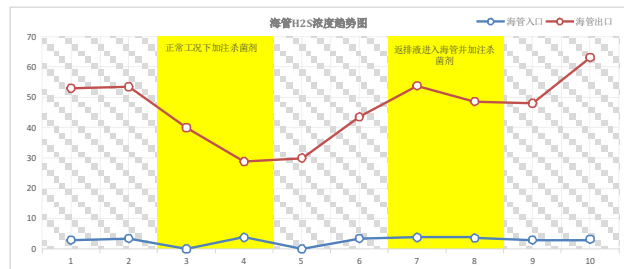


图 4 返排期间海管 H<sub>2</sub>S 浓度对比

### 2.4 控制措施评价与优化

缓蚀剂浓度梯度实验 (见图 5) 显示, 15ppm 缓蚀剂未能有效控制返排液腐蚀, 腐蚀速率 (0.2583mm/a) 仍高于控制指标 (0.076mm/a); 而将浓度提升至 30ppm 后, 腐蚀速率显著降至 0.0365mm/a, 满足防护要求。这表明在返排期间, 需采用高于常规的药剂浓度才能形成有效的保护。

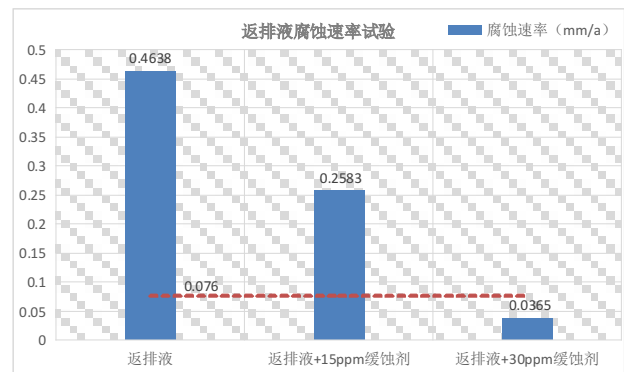


图 5 返排液腐蚀速率实验

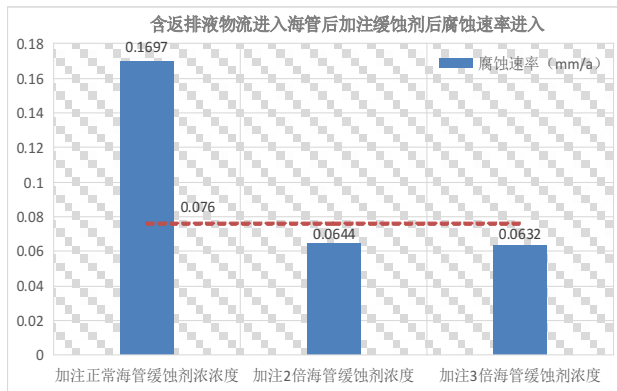


图6 返排液腐蚀速率实验

对于海管系统，返排期间采用双倍缓蚀剂预膜技术后，腐蚀速率可从0.1697mm/a降至0.0644mm/a，降幅达62.1%。该技术通过提高初始成膜浓度，增强了保护膜在高流速条件下的附着力和稳定性。

基于上述研究，建立了返排期间综合控制措施：

**药剂优化：**在闭排罐出口设置缓蚀剂加注点，浓度提升至30ppm；返排期间，海管缓蚀剂采用双倍浓度。

**清管强化：**返排结束后立即进行清管作业，清管器尼龙刷过盈量提升至3%，有效清除管内沉积物。

**全过程监测：**建立返排前、中、后的全过程腐蚀监测体系，实时跟踪腐蚀因子变化，及时调整控制策略。

### 3 结论

a. 海上油田返排液具有高腐蚀性、高微生物含量的显著特征，返排期间生产系统腐蚀速率可达常规工况的2.3–2.7倍。

b. 明确了返排期间缓蚀剂的适用边界，浓度 $\geq 30\text{ppm}$ 时可有效控制腐蚀；海底管道采用双倍缓蚀剂预膜技术是应

对返排期间高腐蚀风险的有效手段。

c. 建立的以“药剂优化–清管强化–全过程监测”为核心的综合控制措施，经现场验证可显著降低返排期间的腐蚀风险，为海上油田安全高效作业提供了技术保障。

### 参考文献：

[1] 王磊, 刘静, 张建国, 等. 高含硫油气田集输系统腐蚀研究进展 [J]. 石油化工腐蚀与防护, 2021, 38(3): 1–6.

[2] 赵东风, 王正政, 李金兆, 等. 硫酸盐还原菌对碳钢腐蚀行为的影响机理 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(2): 105–112.

[3] 李云辉, 孙成, 许进. 咪唑啉类缓蚀剂在 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 环境中的缓蚀行为 [J]. 石油化工腐蚀与防护, 2019, 36(4): 15–19.

[4] 胡丽华, 张雷, 吴超.  $\text{Cl}^-$ 与SRB协同作用下X65钢的点蚀行为研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2022, 34(1): 31–37.

[5] 中国腐蚀与防护学会. 腐蚀试验方法与防腐蚀检测技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.

[6] 中国海洋石油集团有限公司开发生产专业标准化委员会. 中国海洋石油集团有限公司企业标准: Q/HS 2064–2022[S]. 北京: 石油工业出版社, 2023.[6] Development and Production Professional Standardization Committee of CNOOC. Enterprise Standard of CNOOC: Q/HS 2064–2022[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2023.

**作者简介：**张曼杰(1977—)，女，汉，本科，研究方向：海底管道腐蚀与防护。