

# 油田用高效缓蚀剂复配技术及性能评价

孟凡成

濮阳市科洋化工有限公司 河南 濮阳 457001

**【摘要】**：油田开发过程中，井下管柱、集输管线及相关设备长期处于高盐、高温、含硫、含CO<sub>2</sub>等复杂腐蚀环境中，金属腐蚀问题易造成设备失效、生产中断和安全风险。围绕高效缓蚀剂复配技术展开研究，重点分析不同缓蚀组分之间的协同作用机制、配伍规律及性能评价方法。通过缓蚀率、吸附成膜能力、耐温耐盐性能和现场适应性等指标评价复配体系效果，为油田腐蚀防护材料优化提供技术依据。

**【关键词】**：油田腐蚀；高效缓蚀剂；复配技术；协同作用；性能评价

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.001

## 引言

油田开采与集输过程中，金属设备常受到矿化水、酸性气体、溶解氧及微生物等因素影响，腐蚀问题会降低设备寿命并增加维护成本。单一缓蚀剂在复杂油田环境中常存在适应性不足、缓蚀效率不稳定等问题。通过缓蚀剂复配技术构建多组分协同体系，可改善吸附成膜效果，提高防护稳定性。研究高效缓蚀剂复配技术及其性能评价，对提升油田腐蚀控制水平具有重要意义。

## 1 油田腐蚀防护需求与复配体系构建依据

### 1.1 复杂介质环境下金属腐蚀加剧

油田开采、注水、集输和处理环节中，金属材料长期处于多因素共同作用的腐蚀环境，腐蚀介质并非单一存在，而是由高矿化度地层水、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、溶解氧、Cl<sup>-</sup>、固体颗粒及温度压力变化等因素共同构成。高矿化度水体中的Cl<sup>-</sup>具有较强的穿透能力，容易破坏金属表面原有保护膜，使局部腐蚀逐渐发展为点蚀、缝隙腐蚀或垢下腐蚀。CO<sub>2</sub>溶于水后形成碳酸，使介质酸化，促进铁基材料发生电化学反应；H<sub>2</sub>S则可能诱发硫化物应力腐蚀和氢脆问题，使管柱、套管和集输管线的服役风险进一步增加。温度升高会加快腐蚀反应速率，压力变化又会影响腐蚀产物膜的稳定性，导致保护层出现疏松、开裂或脱落现象。在油田生产后期，含水率升高、注采强度加大、采出液组成复杂化，使腐蚀介质与金属表面的接触更加频繁，设备内壁腐蚀形态呈现多样化和隐蔽化特点。若腐蚀控制不足，井下管柱减薄、穿孔、泄漏和断裂等问题会增加检修频次，影响油气连续生产，也会提高安全管理和维护成本。因此，复杂介质环境下的腐蚀加剧已成为油田材料防护技术中必须重点解决的关键问题（见图1）。



图1 复杂介质环境下金属腐蚀加剧

### 1.2 单一缓蚀剂适配范围受限

单一缓蚀剂通常依靠分子中的极性基团在金属表面吸附，形成一定厚度的保护膜，从而降低腐蚀介质与金属基体之间的直接接触。油田腐蚀环境具有温度高、盐度高、流速变化大、酸性气体含量波动明显等特征，单一组分往往难以同时满足多种工况要求<sup>[1]</sup>。部分有机胺类缓蚀剂在低温或中等矿化度条件下具有较好的吸附能力，但在高温环境中可能出现挥发、分解或吸附膜稳定性下降的问题；季铵盐类缓蚀剂对金属表面具有较强亲和力，但在高含盐体系中可能受到离子竞争影响，导致有效吸附量降低；咪唑啉类缓蚀剂成膜性能较好，但在含硫、含CO<sub>2</sub>和高流速条件下，保护膜容易受到冲刷破坏。单一缓蚀剂还可能存在溶解性、分散性和配伍性不足的问题，与杀菌剂、阻垢剂、破乳剂共同使用时发生沉淀、分层或性能削弱，影响药剂在现场体系中的稳定投加。油田不同区块的采出液组成差异较大，同一缓蚀剂在某一区块表现良好，并不代表能够适用于其他高矿化度或高酸性气体区块。由于单一药剂的作用机理较为单一，面对多腐蚀因素叠加时，其缓蚀率容易出现波动，难以形成长期稳定的防护效果，这也是推动缓蚀剂复配技术发展的重要现实依据。

### 1.3 多组分协同防护体系形成

多组分协同防护体系是在单一缓蚀剂性能受限的基础上，通过主剂、助剂、增效剂、分散剂和稳定剂之间的合理配伍，形成覆盖面更广、稳定性更强的缓蚀体系。复配体系并不是简单地将多种药剂混合，而是依据不同组分的分子结构、吸附能

力、亲水疏水平衡、离子特性和成膜方式进行优化组合。主缓蚀剂通常负责在金属表面形成基础吸附膜，含氮、含氧、含硫等活性基团可与金属表面产生配位吸附或静电吸附，降低阳极溶解和阴极还原反应速率。助剂可改善保护膜致密性和连续性，使吸附层在高温、高盐或流动介质中保持较好的附着力。表面活性组分能够提高药剂在水相和油水混合体系中的分散能力，使缓蚀剂更均匀地到达腐蚀界面。稳定剂则可降低复配体系在储存、运输和现场投加过程中的分层、沉淀或失效风险。多组分之间产生协同效应后，缓蚀膜不再依赖单一吸附方式，而是通过物理吸附、化学吸附、疏水屏蔽和界面调控共同发挥防护效果。在实际油田条件下，复配缓蚀剂能够针对CO<sub>2</sub>腐蚀、H<sub>2</sub>S腐蚀、Cl<sup>-</sup>点蚀和冲刷腐蚀等多种问题建立综合防护屏障，提高药剂对复杂介质的适应性，为后续缓蚀率测试、动态模拟评价和现场应用验证奠定技术基础。

## 2 高效缓蚀剂复配方案与性能评价路径

### 2.1 主剂与助剂配伍关系优化

主剂与助剂配伍关系的优化，应围绕油田腐蚀介质组成、金属材质特征和药剂界面行为展开。主剂多选择咪唑啉衍生物、有机胺、季铵盐或含硫杂环化合物等具有较强吸附能力的组分，其分子中的氮、氧、硫等活性原子能够与金属表面形成稳定结合，为缓蚀膜提供主体结构。助剂则承担增溶、分散、稳膜和补强等功能，可通过醇类、非离子表面活性剂、磷酸酯类化合物或少量无机盐类组分改善主剂在高矿化度水体中的分布状态。配伍优化过程中，需要控制各组分比例，避免主剂浓度过高造成乳化增强、油水分离困难或药剂浪费，也要防止助剂比例不足导致成膜不完整。不同组分之间还应保持良好相容性，不能在采出液、注入水或酸性气体环境中发生沉淀、絮凝和分层。通过正交试验、单因素试验或响应面分析，可比较不同复配比例下的缓蚀率、界面张力、溶解性和外观稳定性，筛选出适合目标油田工况的最佳组合。配伍关系优化的重点不在于组分数量增加，而在于主剂吸附能力、助剂调控能力和体系稳定性之间形成平衡，使复配缓蚀剂在低投加量条件下仍能保持较高防护水平。

### 2.2 吸附成膜与缓蚀效率测定

吸附成膜与缓蚀效率测定是评价复配缓蚀剂性能的核心环节，需要从金属表面状态和腐蚀速率变化两个层面进行判断。挂片失重法可直接反映试样在模拟油田水中的质量损失，通过腐蚀前后质量差、暴露面积和试验时间计算腐蚀速率，并进一步得到缓蚀率。电化学测试能够更灵敏地观察缓蚀剂对腐蚀反应过程的影响，极化曲线可用于分析阳极溶解和阴极还原反应受到抑制的程度，电化学阻抗谱则能够反映吸附膜电阻、界面电荷转移阻力和膜层致密性变化<sup>[2]</sup>。复配体系降低腐蚀电流密度、增大阻抗弧半径，表明缓蚀膜阻隔腐蚀介质能力优异。

可通过扫描电镜、能谱分析等观测金属表面形貌与疏水性，优质膜层均匀完整、腐蚀痕迹少、疏水性强。试验需贴合现场工况条件，结合失重、电化学及表面分析，综合判定缓蚀剂成膜与防腐性能。

### 2.3 耐高温耐盐与配伍稳定性评价

耐高温耐盐与配伍稳定性评价，用于检验复配缓蚀剂在油田复杂工况下的长期应用性能。高温易破坏药剂分子结构与防护吸附膜，造成组分水解、挥发、吸附性能衰减，因此需设置多梯度温度开展静态腐蚀试验，核查缓蚀率的稳定性。高盐环境中的Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>等离子会提升水体离子强度，干扰药剂溶解与金属吸附效果，易造成药剂析出沉淀、防护膜疏松失效。可配置不同矿化度模拟水样，检测体系外观、浊度、沉降状态、pH及有效成分留存率。同时需考核药剂配伍性能，缓蚀剂与阻垢剂、杀菌剂、破乳剂等油田常用药剂混用时，可能出现药效衰减、乳化加剧、沉积物增多等问题。可通过混配观测、离心测试、热储试验及现场水样验证，判定药剂在储存、稀释、连续投加过程中的可靠性。只有在高温、高盐及多药剂共存工况下，保持分散稳定、无沉淀且缓蚀性能稳定的复配体系，方可满足现场应用验证基础条件（见图1）。

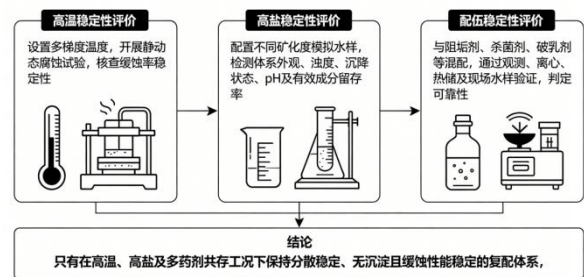


图2 耐高温耐盐与配伍稳定性评价

## 3 复配缓蚀剂应用验证与技术优化方向

### 3.1 典型油田工况下应用效果分析

油田缓蚀剂现场应用需结合井下管柱、集输管线、注水系统及联合站设备等场景开展效果分析。各生产环节腐蚀介质差异显著，井下存在高温高压及CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S腐蚀问题，集输系统易受高含水采出液、溶解氧、悬浮物及流速波动影响。现场需在井口、集输干线、注水管网等高危腐蚀节点设加药点，通过连续、周期冲击或分段投加方式，结合含水率、温度、腐蚀监测数据确定投加方案，让药剂提前形成防护。现场需依托挂片、在线探针、铁离子含量、壁厚检测等开展综合评价，摒弃单次缓蚀率检测的单一标准。同时需验证药剂适配性，避免引发乳化、结垢、堵塞等问题，核心是推动实验室配方适配现场实际腐蚀工况。

### 3.2 缓蚀率提升与设备寿命改善

缓蚀率提升与设备寿命改善之间存在直接关联，复配缓蚀

剂的应用价值需要通过腐蚀速率下降、检修周期延长和设备失效风险降低来体现。在未采取有效防护或单一药剂防护不足的情况下,油田管线内壁容易出现局部减薄、点蚀坑扩展和焊缝区域腐蚀加深等问题,长期运行后可能引发穿孔、泄漏和停输检修。复配缓蚀剂增强吸附膜连续性、降低腐蚀电流密度和减少腐蚀介质渗透,可使单位时间内金属损失量明显下降<sup>[3-5]</sup>。现场可对比加药前后的腐蚀挂片失重数据、在线探针腐蚀速率、管线超声测厚结果和维修记录,判断设备寿命改善程度。若腐蚀速率由较高水平降至油田控制标准以内,管线壁厚损失速度减缓,异常停产次数减少,说明复配体系对设备完整性管理具有支撑效果。设备寿命改善还体现在维护方式由被动抢修向预防控制转变,腐蚀监测数据能够为加药浓度调整、重点管段巡检和风险分级管理提供依据。对于含CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S及高矿化度水并存的区块,缓蚀率稳定提升可降低腐蚀穿孔概率,减少更换管柱、补焊管线和停产处置带来的成本消耗,使油田生产系统保持更长周期的安全运行。

### 3.3 低毒环保型复配体系发展

低毒环保复配缓蚀体系研发,需统筹缓蚀效能、环境安全与现场应用持续性。传统缓蚀剂存在刺激性强、生物降解性弱、

水体易残留等问题,伴随油田采出水处理、废水回注及排放管控标准升级,环保性成为配方优化核心方向。配方优选可降解表面活性剂、植物基、氨基酸、绿色咪唑啉衍生物及无重金属、低磷助剂,削减生态危害。合理管控药剂投加量,依托分子吸附与组分协同作用缩减用药总量,规避高剂量引发二次污染。环保评估需兼顾缓蚀效果,同步检测毒性、降解率、污染物含量及对水处理工艺的干扰。现场应用适配破乳、絮凝、回注等工序,杜绝药剂残留阻碍油水分离、加重处理负担。后续可依托分子定向改性、可再生原料、智能响应材料优化配方,适配复杂腐蚀工况,契合油田绿色开采与精细化工管控标准。

## 4 结语

高效缓蚀剂复配技术能够针对油田高温、高盐、含酸性气体等复杂腐蚀环境形成协同防护体系,弥补单一缓蚀剂适应性不足和防护稳定性有限的问题。通过主剂与助剂科学配伍、吸附成膜性能测定、耐高温盐及配伍稳定性评价,可提升缓蚀体系的应用可靠性。现场应用中,复配缓蚀剂有助于降低腐蚀速率、延长设备服役周期、减少检修成本。面向绿色油田建设,低毒、可降解、高效稳定的复配体系将成为油田腐蚀防护材料优化的重要方向。

## 参考文献:

- [1] 罗诉舟,刘友权,周厚安,等.高温气举排水井缓蚀阻垢剂优选与应用[J].石油与天然气化工,2025,54(04):75-81.
- [2] 幸雪松,冯桓楷,陈欢,等.油套管用抗 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 腐蚀的缓蚀剂应用研究进展[J].石油管材与仪器,2024,10(06):7-13.
- [3] 许怀宇.油田井下长效缓释型阻垢缓蚀剂的合成及性能研究[D].中国石油大学(北京),2024.
- [4] 余刘杰.井下缓释型缓蚀阻垢剂的制备及性能研究[D].中国石油大学(北京),2020.
- [5] 王云飞.油田复配型阻垢剂的制备与性能研究[D].陕西科技大学,2020.