

海底管道防腐药剂有效性评价数智模型算法研究与开发

宋志强 赵东红 赵可天 苑世宁 孙玉江 (天津市海底管道重点实验室, 海油发展海底管道安全服役保障技术重点实验室, 中海油(天津)管道工程技术有限公司, 天津 300450)

摘要: 海洋油气开采过程中, 海底管道的腐蚀问题严重影响着设施的安全性与运营效率。为此, 采用化学药剂进行管道内防腐处理成为一种有效手段, 加注化学药剂在减少管道腐蚀、延长使用寿命方面具有明显效果。但药剂出厂质量、效果、多种药剂之间配伍性等方面因素影响着化学药剂的使用效果, 通过对缓蚀剂、防垢剂、杀菌剂三种常见加注海底管道内化学药剂的三种有效性评估(质量评价、效果评价、配伍性评价), 分析其在海底管道生产作业过程中的应用效果与影响因素, 评估确保达标后再投入使用, 能更好的提高防腐效果, 保障海底管道生产安全。同时, 此研究方法为海洋石油工程中管道腐蚀防护提供了理论依据和技术支持。

关键词: 海底管道; 化学药剂; 有效性评估

0 引言

海洋油气资源开发在全球能源供应中占据越来越重要的地位。随着开采量的不断增加, 投产的海底管道越来越多, 使用年限越来越长, 遭遇的腐蚀问题也愈发严重。海底管道腐蚀不仅威胁到石油天然气的输送安全, 还可能导致环境污染和经济损失。通过加注化学药剂进行管道内防腐处理能缓解管道腐蚀破坏影响, 有效延长管道使用年限。为此, 对加入的药剂质量、效果的把控尤为重要。本文旨在通过实验和理论分析, 研究不同类型的化学药剂的有效性, 评估其在实际应用中的性能表现能否合格, 为油气公司实际加药作业提供参考。

1 海底管道内部常见问题与化学药剂应用背景

1.1 海底管道内部常见问题

海底管道作为输送石油、天然气等能源的重要通道, 长期受到海水和油气混合物等复杂介质的侵蚀。其主要面临的问题包括: ①腐蚀问题: 海底管道长期暴露在海水和油气介质中, 容易发生电化学腐蚀。腐蚀会导致管道壁厚减薄, 降低管道的强度和承压能力, 甚至可能导致管道泄漏。②结垢问题: 海底管道内部长期运行过程中, 海水中的钙镁离子、硫酸盐等成分容易与水中的溶解气体反应, 生成结垢物质。这些沉积物会附着在管道内壁, 影响流体流动, 增加能量消耗, 甚至导致管道堵塞。③生物附着问题: 海水中的微生物(如细菌、藻类等)会附着在海底管道内壁, 形成生物膜。生物膜不仅会影响输送流体的流动, 还可能与其他腐蚀和结垢现象共同作用, 加剧管道的老化。

1.2 化学药剂的应用背景

为了解决海底管道内部的腐蚀、结垢和生物附着等问题, 加注化学药剂成为了一种常见的解决方案。主要添加3类化学药剂来提高海底管道生产的稳定性和延长其使用寿命^[1]:

缓蚀剂: 通过形成保护膜或降低电化学腐蚀速率来减少腐蚀产物的形成。

防垢剂: 通过改变结垢物质的结晶结构, 防止其附着在管道内壁, 减少结垢发生。

杀菌剂: 通过防止和控制微生物的生长, 尤其是细菌、真菌以及其他有害微生物附着在海底管道内壁。

2 研究内容和方法

2.1 研究内容

药剂质量评价、药剂效果评价、药剂配伍性评价。

2.2 药剂质量评价方法

依据药剂产品质量标准和现有业务基础, 开展药剂产品质量评估模型算法提炼, 研究构建海底管道化学药剂产品抽检质量评估模型, 实现对海底管道防腐药剂使用过程中的缓蚀剂、防垢剂、杀菌剂产品出厂质量的抽检评估。

药剂质量评价项目包括外观, pH、闭口闪点、乳化倾向、溶解性、凝点、密度和粘度八个方面。每个项目评价过程依据试验标准不同。

①外观依据标准《GB T 6540-1986 石油产品颜色测定法》。②pH依据标准《GB T 22592-2008 水处理剂 pH值测定方法通则》。③闭口闪点依据标准《GB T 261-2021 闪点的测定 宾斯基-马丁闭口杯法》。④乳化倾向依据标准《GB T 35509-2017 油气

田缓蚀剂的应用和评价》。⑤溶解性依据标准《GB T 6324.1-2004 有机化工产品试验方法 第1部分_液体有机化工产品水混溶性试验标准》。⑥凝点依据标准《GB T 510-2018 石油产品凝点测定法》。⑦密度依据标准《GB T 4472-2011 化工产品密度、相对密度的测定》，计算密度可选三种方法，分别为密度瓶法、韦氏天平法、密度计法。⑧粘度依据标准《GB T 10247-2008 粘度测量方法》采用涂料测定法。

密度和粘度可通过输入过程检测数据计算出结果。外观、pH等其他检测项目可直接输入检测结果。各个质量评价项目结果与厂家提供MSDS说明和该药剂基线数据进行罗列对比，对比结果一样则该项目合格，反之不合格。综合各个项目对比结果，输出药剂质量评价结论。

2.3 药剂效果评价方法

依据相应试验标准和评价标准，开展海底管道防腐药剂效果评价算法提炼，构建海底管道防腐药剂效果评价模型，实现对海底管道已加注缓蚀剂、防垢剂、杀菌剂的缓蚀率、防垢率、杀菌率指标进行诊断，有效管控海底管道防腐药剂使用过程的有效性、经济型。

2.3.1 缓蚀剂效果评价

依据标准《GB T 35509-2017 油气田缓蚀剂的应用和评价》开展空白腐蚀速率、加药腐蚀速率、点蚀速率、均匀腐蚀缓蚀率、点蚀缓蚀率各指标试验计算表工作。依据企业标准《QH/S 2064 海上油气田生产工艺系统内腐蚀控制及效果评价要求》进行各指标评判，从而构建出缓蚀剂效果评价模型^[2]。

指标评判结果依据标准如表1。

通过各指标结果输出对应的缓蚀剂效果评价结论与维保措施如下：①不论空白腐蚀速率大小，加入缓蚀剂后最终腐蚀速率不大于0.03mm/a，无点蚀且配伍性好，则缓蚀剂满足要求。结果为合格，维保措施：维持现状。②加入缓蚀剂后最终腐蚀速率大于0.03mm/a，但空白腐蚀速率0.25mm/a，缓蚀率 $\geq 70\%$ ，且无点蚀。结果为合格，维保措施：维持现状。③加入缓蚀剂后最终腐蚀速率大于0.03mm/a，0.25mm/a < 空白腐蚀速率

$\leq 0.75\text{mm/a}$ ，点蚀速率 $\leq 0.13\text{mm/a}$ ，配伍性：a 满足本表缓蚀率和点蚀率要求；b 防垢剂率影响 $\leq 5\%$ 。c 不降低其他药剂性能；d 加注其他药剂后缓蚀效果仍满足要求。结果为合格，维保措施：维持现状。④加入缓蚀剂后最终腐蚀速率大于0.03mm/a，空白腐蚀速率 $> 0.75\text{mm/a}$ ，缓蚀率 $\geq 90\%$ ，点蚀速率 $\leq 0.21\text{mm/a}$ 。结果为合格，维保措施：维持现状。⑤空白腐蚀速率 $< 0.25\text{mm/a}$ ，加药后出现点蚀。结果为不合格，维保措施：a 空白有点蚀，加药有点蚀，需考虑药剂配伍性问题，要进行药剂配伍性评价。b 空白无点蚀，加药有点蚀，药剂不合格，需进行药剂换型。⑥空白腐蚀速率 $< 0.25\text{mm/a}$ ，无点蚀，缓蚀率 $< 70\%$ 。结果为不合格，维保措施：建议进行药剂浓度优化，若药剂浓度增加后缓蚀率增加不明显，则建议进行药剂换型。⑦ $0.25\text{mm/a} < \text{空白腐蚀速率} \leq 0.75\text{mm/a}$ ，加药后点蚀速率 $> 0.13\text{mm/a}$ 。结果为不合格，维保措施：建议进行药剂换型。⑧ $0.25\text{mm/a} < \text{空白腐蚀速率} \leq 0.75\text{mm/a}$ ，无点蚀，加药后腐蚀速率 $> 0.076\text{mm/a}$ 。结果为不合格，维保措施：a 现场水空白腐蚀速率大，结合现场挂片数据，若现场挂片数据稳定，且不高，则需考虑是否试验过程出现问题，需复测。b 现场水空白腐蚀速率大，现场挂片腐蚀速率也高，需进行药剂浓度调整，若浓度调整后，仍不能满足要求，则需进行药剂换型。c 模拟水空白腐蚀速率大，结合现场挂片数据分析，若现场挂片数据稳定，且都为低度腐蚀，建议以现场数据为准。d 模拟水空白腐蚀速率大，现场挂片腐蚀速率也高，需进行药剂浓度调整，若浓度调整后，仍不能满足要求，则需进行药剂换型。⑨空白腐蚀速率 $> 0.75\text{mm/a}$ ，无点蚀，缓蚀率 $< 90\%$ 。结果为不合格，维保措施：建议进行药剂换型。⑩空白腐蚀速率 $> 0.75\text{mm/a}$ ，加药后点蚀速率 $> 0.21\text{mm/a}$ 。结果为不合格，维保措施：建议进行药剂换型。

2.3.2 防垢剂效果评价

依据标准《QHS 2057-2021》附录B7.1开展综合防垢率指标试验计算工作。依据企业标准《QHS 2057-2021》5.3.4进行指标评判，从而构建

表1 指标评判结果表

指标	BCR ≤ 0.25	$0.25 < \text{BCR} \leq 0.75$	BCR > 0.75
缓蚀率，%	≥ 70		≥ 90
加入缓蚀剂后腐蚀速率，mm/a		≤ 0.076	
点蚀速率，mm/a	无点蚀	≤ 0.13	≤ 0.21
配伍性	不降低其他药剂性能	1) 满足本表缓蚀率和点蚀率要求； 2) 防垢剂率影响 $\leq 5\%$ ； 3) 不降低其他药剂性能； 4) 加注其他药剂后缓蚀效果仍满足本表要求	

出防垢剂效果评价模型。

通过各指标结果输出对应的防垢剂效果评价结论与维保措施如下：①防垢率大于 60%，结果为合格，维保措施：维持现状；②防垢率小于 60%，结果为不合格，维保措施：考虑药剂配伍性问题，如果药剂配伍性没有问题，则需进行药剂换型。

2.3.3 杀菌剂效果评价

依据标准《SY T 5329-2012 碎屑岩油藏注水水质指标及分析方法》开展注水 SRB 含量、混输海管 SRB 含量指标试验计算工作，从而构建出杀菌剂效果评价模型。

通过各指标结果输出对应的杀菌剂效果评价结论与维保措施如下：①注水 SRB 含量 < 25 个 /ml，结果为合格，维保措施：维持现状。②混输海管 SRB 含量 < 110 个 /ml，结果为合格，维保措施：维持现状。③注水 SRB 含量 ≥ 25 个 /ml，结果为不合格，维保措施：进行药剂换型，选择针对性的药剂进行杀菌。④混输海管 SRB 含量 ≥ 110 个 /ml。结果为不合格，维保措施：进行药剂换型，选择针对性的药剂进行杀菌。

2.4 药剂配伍性评价方法

2.4.1 缓蚀剂配伍性评价

依据标准《GBT 35509-2017 油气田缓蚀剂的应用和评价》和《QHS 2057-2021》开展空白腐蚀速率、加药腐蚀速率、点蚀速率、均匀腐蚀缓蚀率、点蚀缓蚀率等各指标试验计算工作。依据企业标准《QH/S 2064 海上油气田生产工艺系统内腐蚀控制及效果评价要求》-表一，进行各指标评判，从而构建出缓蚀剂配伍性评价模型。

通过各指标结果输出对应的缓蚀剂配伍性评价结论与维保措施如下：①加入缓蚀剂后最终腐蚀速率大于 0.03mm/a ，空白腐蚀速率 $\leq 0.25\text{mm/a}$ ，缓蚀率 $\geq 70\%$ 且无点蚀，结果为合格，维保措施：不降低其他药剂性能。②加入缓蚀剂后最终腐蚀速率大于 0.03mm/a ， $0.25\text{mm/a} < \text{空白腐蚀速率} \leq 0.75\text{mm/a}$ ，点蚀速率 $\leq 0.13\text{mm/a}$ ，配伍性：a 满足本表缓蚀率和点蚀率要求。b 防垢剂率影响 $\leq 5\%$ 。c 不降低其他药剂性能。d 加注其他药剂后缓蚀效果仍满足要求，结果为合格，维保措施：不降低其他药剂性能。③加入缓蚀剂后最终腐蚀速率大于 0.03mm/a ，空白腐蚀速率 $> 0.75\text{mm/a}$ ，缓蚀率 $\geq 90\%$ ，点蚀速率 $\leq 0.21\text{mm/a}$ ，结果为合格，维保措施：不降低其他药剂性能。④其余情况，结果为不合格，维保措施：根据空白腐蚀速率，

水质结垢情况，细菌含量，进行优先级排序，现场腐蚀为主，定好缓蚀剂后，调整防垢剂型号，杀菌剂型号，以配合防腐。

2.4.2 防垢剂配伍性评价

依据标准《QHS 2057-2021》附录 B7.1 开展综合防垢率指标试验工作。依据《QH/S 2064 海上油气田生产工艺系统内腐蚀控制及效果评价要求》进行指标评判 - 表一，从而构建出防垢剂配伍性评价模型。

通过各指标结果输出对应的防垢剂配伍性评价结论与维保措施如下：①防垢剂率影响 $\leq 5\%$ ，结果为合格，维保措施：维持现状。②防垢剂率影响 $> 5\%$ ，结果为不合格，维保措施：根据空白腐蚀速率，水质结垢情况，细菌含量，进行优先级排序，现场腐蚀为主，定好缓蚀剂后，调整防垢剂型号，杀菌剂型号，以配合防腐。

2.4.3 杀菌剂配伍性评价

依据标准《SY T 5329-2012 碎屑岩油藏注水水质指标及分析方法》开展杀菌率指标试验工作，从而构建出杀菌剂配伍性评价模型。

通过各指标结果输出对应的杀菌剂配伍性评价结论与维保措施如下：①加药后膜率系数 $\geq$ 加药前膜率系数且加药后杀菌率 $\geq$ 加药前杀菌率，结果为合格，维保措施：其他药剂不降低杀菌剂的膜率系数和杀菌率。②其余情况，结果为不合格，维保措施：药剂换型。

3 结论

在药剂加注使用前，依据标准对药剂的质量、效果、配伍性三个方面进行有效判断，选择质量合格，效果理想，且满足多种药剂混用时配伍性相容性高的药剂，才能保证药剂在海底管道内发挥的综合效果足够好，进而有效减缓海底管道的腐蚀速率，延长管道的使用寿命。合理选择药剂是影响其防腐效果的第一步，也是重中之重，未来需要在实际应用中不断优化，进一步研究新型防腐药剂更为精确的有效性评价技术。

参考文献：

- [1] 胡昭朝, 李羽, 刘言霞, 陆原. 海上某油田腐蚀因素分析及防腐综合治理研究 [J]. 广州化工, 2023, 51(21): 23-25.
- [2] 张峙, 杨炳华, 甄志鹏, 郑树伟. 一种缓蚀剂性能评价试验系统的设计与应用 [J]. 石油化工设备, 2019, 48(04).