

泡排剂对页岩气集气管道内壁腐蚀行为的影响研究

罗 凯, 喻先渝, 杨潇宇, 薛久僚, 侯玉瑶, 周雨琦

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年5月19日; 录用日期: 2026年7月7日; 发布日期: 2026年7月15日

摘 要

页岩气井生产中后期普遍面临井筒及集气管道积液问题, 泡沫排水采气工艺是保障气井稳产的关键技术手段, 但工艺所加注的泡排剂会改变管道内部腐蚀环境, 对管线钢的腐蚀规律产生显著影响。为揭示现场常用泡排剂对集气管道内壁腐蚀的作用机制, 以页岩气田集气管线采用L360NS管线钢为研究对象, 利用电化学测试, 系统研究了在0.3%加注浓度下起泡剂、消泡剂及其复配体系与空白实验对管线钢均匀腐蚀与局部点蚀行为的影响规律。结果表明: 单加0.3%起泡剂会显著负移腐蚀电位、增大腐蚀电流密度、降低界面电荷转移电阻, 强烈促进均匀腐蚀与点蚀萌生; 单加0.3%消泡剂可正向偏移腐蚀电位、减小腐蚀电流密度、形成致密防护膜, 表现出优良的缓蚀与抗点蚀性能; 起泡剂与消泡剂复配后, 消泡剂可有效抵消起泡剂的腐蚀加剧效应, 使腐蚀速率与局部腐蚀风险回落至接近空白组水平。该研究结果可为页岩气田泡排剂加注方案优化、集气管道腐蚀防控与安全运行提供实验依据与理论支撑。

关键词

泡排剂, 页岩气, 集气管道, 腐蚀行为, 内壁腐蚀, 起泡剂, 消泡剂, 点蚀

Study on the Corrosion Behavior of Shale Gas Gathering Pipeline Inner Wall Affected by Foam Drainage Agent

Kai Luo, Xianyu Yu, Xiaoyu Yang, Jiuliao Xue, Yuyao Hou, Yuqi Zhou

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: May 19, 2026; accepted: July 7, 2026; published: July 15, 2026

文章引用: 罗凯, 喻先渝, 杨潇宇, 薛久僚, 侯玉瑶, 周雨琦. 泡排剂对页岩气集气管道内壁腐蚀行为的影响研究[J]. 化学工程与技术, 2026, 16(4): 296-303. DOI: 10.12677/hjct.2026.164028

Abstract

Liquid loading in wellbores and gathering pipelines commonly occurs during the middle and late production stages of shale gas wells. Foam drainage gas recovery technology serves as a key method to ensure stable gas production. However, the injected foam drainage agents alter the internal corrosive environment of pipelines and significantly affect the corrosion characteristics of pipeline steel. To clarify the action mechanism of commonly used foam drainage agents on the corrosion of the inner wall of gathering pipelines, L360NS pipeline steel applied in shale gas field gathering pipelines was selected as the research material. Electrochemical tests were conducted to systematically investigate the uniform corrosion and localized pitting corrosion of the steel exposed to foaming agent, defoamer, and their composite system at a mass concentration of 0.3%, with a blank group set for comparison. The results show that the single addition of 0.3% foaming agent remarkably shifts the corrosion potential negatively, increases corrosion current density, and reduces the interfacial charge transfer resistance, which greatly accelerates uniform corrosion and pitting initiation. The single addition of 0.3% defoamer moves the corrosion potential positively, lowers corrosion current density, and forms a dense protective film, presenting excellent corrosion inhibition and pitting resistance. When the foaming agent is compounded with the defoamer, the defoamer can effectively offset the corrosion acceleration effect of the foaming agent, bringing the corrosion rate and localized corrosion risk close to those of the blank group. The findings provide experimental basis and theoretical support for the optimization of foam drainage agent injection schemes, corrosion prevention and control, as well as safe operation of gathering pipelines in shale gas fields.

Keywords

Foam Drainage Agent, Shale Gas, Gathering Pipeline, Corrosion Behavior, Inner Wall Corrosion, Foaming Agent, Defoamer, Pitting Corrosion

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国页岩气资源储量丰富、开发潜力巨大，川南、长宁、昭通等国家级页岩气示范区已实现规模化商业开发，成为支撑国内天然气稳产增产的重要板块。受页岩气藏低压、低渗、低产的固有特性制约，气井进入生产中后期后，地层能量持续衰减，气液两相携液能力大幅下降，地层水与凝析水极易在井筒、集气管道低洼段、弯头及阀门等位置滞留形成积液。积液不仅会造成气井产量下滑、稳产周期缩短，严重时还会导致气井停喷、管线堵塞，同时形成持续的潮湿腐蚀环境，显著提升集气管道腐蚀泄漏风险，直接威胁生产系统运行安全[1]。因此，高效排水采气是保障气井产能、维持集气系统稳定运行的核心环节。

泡沫排水采气工艺凭借成本低、施工简便、适用性强、对地层伤害小等优势，已成为页岩气田应用最广泛的排水采气技术。工程实践表明，合理使用泡排剂可显著提升气井携液能力，有效缓解井筒与管道积液问题。但泡排剂通常由非离子表面活性剂、有机硅、聚醚等有机组分构成，其溶于高矿化度采出水后，会强烈改变金属或介质界面状态，干扰腐蚀电化学过程，使集气管道内壁的腐蚀行为更加复杂[2]。

页岩气集气管道多采用 L245NS、L360NS 等低碳管线钢,在生产环境下本身即存在较高的均匀腐蚀与局部腐蚀倾向[3]。泡排剂的加入,一方面部分表面活性剂可在钢表面吸附成膜,起到一定缓蚀作用;另一方面,药剂分子也可能破坏腐蚀产物膜的连续性,或为 Cl^- 渗透提供通道,诱发点蚀、缝隙腐蚀等局部腐蚀[4]。消泡剂与起泡剂复配后,还会进一步改变界面吸附结构,使腐蚀规律更难预测。

目前,国内外对泡沫排水采气的研究多集中在药剂起泡性能、耐温抗盐性、携液能力等应用指标,针对泡排剂对集气管道内壁腐蚀影响的系统性研究相对不足,尤其缺少贴合现场工况、匹配实际复配体系的定量试验与机理分析[5]。鉴于此,本文严格模拟页岩气集气管道实际环境,采用电化学测试实验,系统研究现场浓度泡排剂对 L360NS 管线钢为主的管道腐蚀行为的影响,揭示其腐蚀机理并提出工程建议,对现场腐蚀防控具有重要理论价值与实际意义。

泡沫排水采气技术最早应用于常规低压气田,后逐步推广至页岩气、致密气等非常规气藏。国外在泡排药剂研发与工艺优化方面起步较早,已形成耐高温、抗高盐、低伤害的高效泡排体系,并建立了较为完善的加注参数设计方法[6]。国内学者结合我国页岩气藏特点与水质条件,开展了大量药剂筛选、复配与现场试验,为不同气田优选出适配的起泡剂与消泡剂体系,有效解决了现场积液问题。

在腐蚀研究方面,现有成果多关注 CO_2 、温度、压力、 Cl^- 等环境因素对管线钢腐蚀行为的影响,证实 L360、L245 钢在酸性高矿化度水环境中腐蚀速率较高,其腐蚀产物以疏松多孔的 FeCO_3 为主,防护能力有限[7]。部分研究表明,表面活性剂类起泡剂可在钢表面形成吸附膜,抑制均匀腐蚀,但也可能提高局部腐蚀风险。然而,针对消泡剂、起泡剂 + 消泡剂复配体系的腐蚀影响研究较少,且多在常温常压下开展,与现场工况差距较大,试验结果难以直接用于现场指导。

总体而言,现有研究尚未形成对泡排药剂在现场工况下腐蚀行为的系统认识,腐蚀影响机制仍不清晰,难以全面支撑泡排工艺优化与管道腐蚀防控需求。因此,开展贴近现场实际的泡排药剂腐蚀行为研究十分必要。

2. L360NS 管道钢电化学腐蚀测试实验

2.1. 实验准备

选用页岩气集输管道常用材质 L360NS 管线钢,主要化学成分为: C 0.15%、Si 0.32%、Mn 1.42%、P 0.011%、S 0.007%、Cr 0.18%、Ni 0.14%、Cu 0.09%、Fe 97.682%;加工为工作电极,工作面积 1 cm^2 ,其余部位用环氧树脂密封,试样表面经 80#~600#砂纸逐级打磨,去离子水清洗晾干后备用。

参照阳春沟页岩气田采出液水质,配制含 Cl^- 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的模拟地层水,在常温常压下作为基础腐蚀介质。主要离子浓度为: Cl^- 10607.38 mg/L、 HCO_3^- 701.73 mg/L、 Ca^{2+} 248.06 mg/L、 Mg^{2+} 29.82 mg/L、 Na^+ 6668.67 mg/L、 K^+ 228.91 mg/L, $\text{pH} = 6.54$ 。

实验药剂采用现场在用药剂: XHY-4M 非离子表面活性剂起泡剂、XXP-1 有机硅聚醚型消泡剂。

2.2. 实验方法

2.2.1. 实验分组

参照国内外页岩气田泡排药剂加注浓度范围(起泡剂 0.15%~0.3%质量分数,消泡剂 0.3%~0.5%质量分数),结合现场常用配比,设置如下:

- 1) 空白组: 模拟地层水,不添加任何泡排药剂;
- 2) 单一起泡剂组: 模拟地层水 + 0.3%起泡剂;
- 3) 单一消泡剂组: 模拟地层水 + 0.3%消泡剂(现场常用中间浓度);

4) 药剂复配组：模拟地层水 + 0.3%起泡剂 + 0.3%消泡剂。

2.2.2. 电化学测试方法

采用三电极体系：工作电极为 L360NS 钢，参比电极为饱和甘汞电极(SCE)，辅助电极为铂片电极。测试温度室温，介质为空气和模拟地层水。

测试内容包括：开路电位(OCP)、动电位极化曲线、电化学阻抗谱(EIS)、循环极化曲线。

3. 电化学实验结果与分析

3.1. 开路电位(OCP)

各组稳定开路电位如表 1 所示：0.3%起泡剂体系开路电位最负，表明起泡剂的引入显著提升了 L360NS 钢的腐蚀热力学活性，增大了腐蚀自发驱动力；单一消泡剂组开路电位显著正向偏移，有效改善了基体腐蚀热力学稳定性；起泡剂与消泡剂复配后，开路电位相较于单一起泡剂组明显正移，证明消泡剂能够有效削弱起泡剂对腐蚀电位的劣化作用，复配体系开路腐蚀状态趋近空白对照组。

Table 1. Open circuit potential of L360NS steel in different systems

表 1. 不同体系下 L360NS 钢开路电位

组别	空白组	0.3%起泡剂	0.3%消泡剂	0.3%起泡剂 + 0.3%消泡剂
E_{OCP}	-0.82 V	-0.84~-0.85 V	-0.80~-0.81 V	-0.83 V

3.2. 动电位 Tafel 极化曲线

图 1 为 L360NS 钢在不同试剂下的 Tafel 极化曲线，经分析得到以下结果：

1) 均匀腐蚀分析

相较于空白对照组，单独添加 0.3%起泡剂后，试样的腐蚀电位 E_{corr} 发生明显负移，同时腐蚀电流密度 I_{corr} 大幅升高，阴阳极极化分支的电流整体显著增大。该结果表明，起泡剂的引入显著降低了体系腐蚀反应活化能，既促进了阴极析氢/氧还原去极化过程，又加速了阳极铁基体的活性溶解过程，最终显著提升了 L360NS 钢的均匀整体腐蚀速率。

对于单一 0.3%消泡剂体系，试样腐蚀电位正向偏移，腐蚀电流密度相较于空白组降低约 31%，阴阳极腐蚀反应均受到明显抑制，体现出消泡剂优异的基础缓蚀性能，能够有效降低管道钢的均匀腐蚀风险。在复配体系(0.3%起泡剂 + 0.3%消泡剂)中，相较于单一起泡剂组别，试样腐蚀电流密度大幅下降，腐蚀电位显著正向回调，整体均匀腐蚀速率回落至与空白组接近的水平，证明消泡剂可有效拮抗、抵消起泡剂带来的腐蚀促进负面效应。

2) 点蚀分析

点蚀萌生与扩展通过阳极极化段曲线特征判断：0.3%起泡剂组的阳极极化曲线无明显钝化平台区，在较高极化电位区间电流即发生急剧陡增，且点蚀击穿电位 E_b 显著负移，说明起泡剂在溶液体系中产生大量微泡沫，易在管道钢基体表面形成闭塞缝隙、氧浓差微观腐蚀电池，大幅提升了基体局部点蚀的萌生与扩展倾向，局部腐蚀失效风险最为突出。

空白组与单一消泡剂组的阳极极化区间走势平缓，具备相对稳定的钝化趋势，点蚀击穿电位更高，钝化膜稳定性更强，材料的局部点蚀抗性优。

而复配药剂体系中，消泡剂可显著消除体系泡沫聚集，破坏闭塞腐蚀微环境，大幅抑制起泡剂诱导的局部点蚀行为，有效提升了 L360NS 钢的抗点蚀能力，将局部腐蚀风险控制至较低水平。

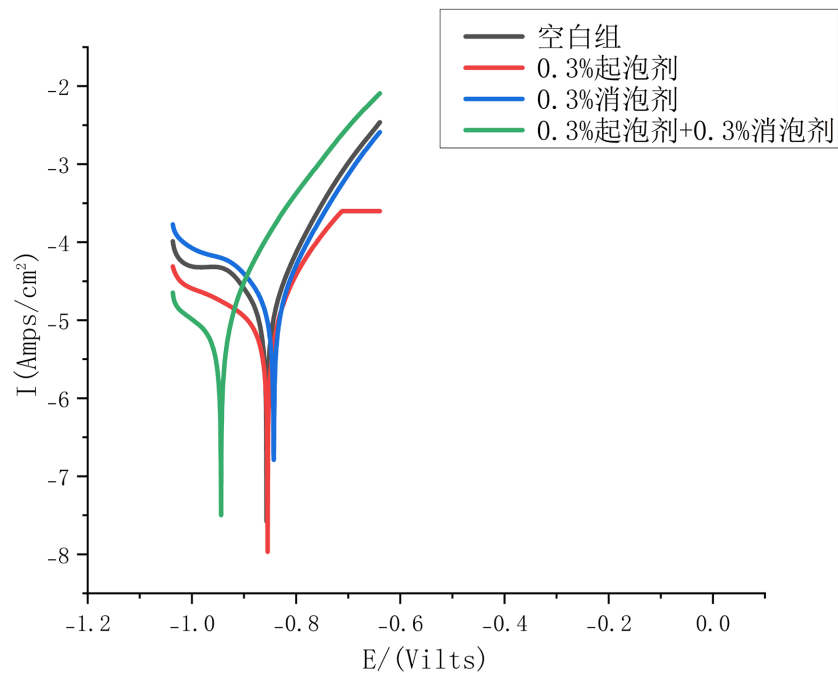


Figure 1. Tafel polarization curves of L360NS steel in different reagents
图 1. L360NS 钢在不同试剂下的 Tafel 极化曲线

3.3. 阻抗 Nyquist 图

分析图 2 可得, 各组试样容抗弧直径大小顺序为: 0.3%消泡剂组 > 0.3%起泡剂 + 0.3%消泡剂组 > 空白组 > 0.3%起泡剂组。

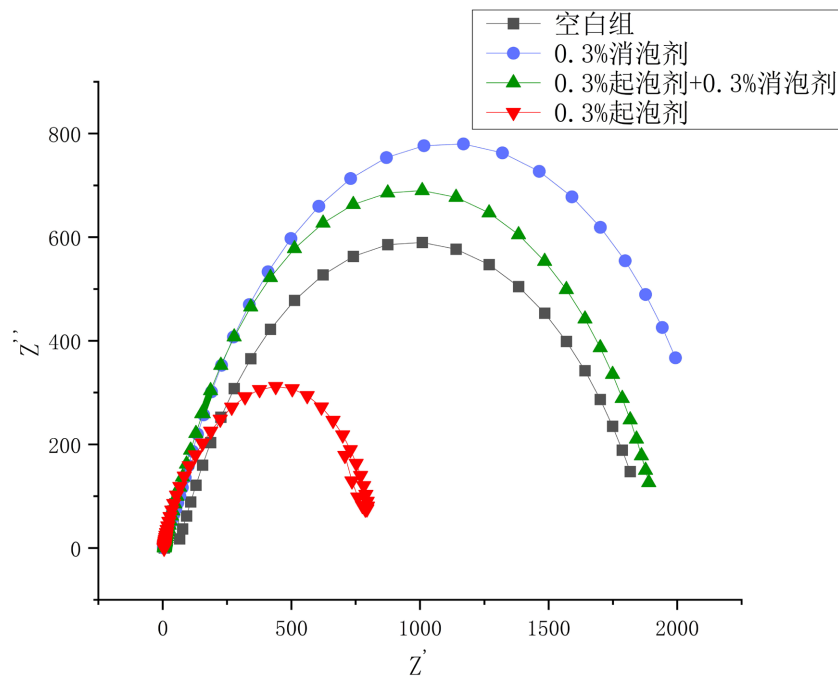


Figure 2. Nyquist impedance plots of L360NS steel in different reagents
图 2. L360NS 钢在不同试剂下的阻抗 Nyquist 图

容抗弧直径与电荷转移电阻正相关,容抗弧直径越小,代表电荷转移电阻越小,腐蚀速率越快;反之容抗弧直径越大,界面腐蚀阻力越强。单一起泡剂组容抗弧直径最小,界面电荷传递阻力最弱,腐蚀速率越快;空白对照组容抗弧直径处于中间水平,代表无添加剂时管道钢的本征腐蚀状态;单一消泡剂组容抗弧直径最大,说明单一消泡剂电荷转移阻力最大,缓蚀防腐效果最好;复配组容抗直径略小于单一消泡剂组且大于空白对照组,远大于单一起泡剂组,说明消泡剂可以有效抵消起泡剂带来的腐蚀加剧效果。

3.4. Tafel 循环极化曲线图

由图 3 可知,相较于空白对照组,0.3%起泡剂体系试样自腐蚀电位显著负移,阳极溶解反应被强烈活化,极化滞后环面积明显增大,均匀腐蚀速率与局部点蚀敏感性显著升高;0.3%起泡剂与 0.3%消泡剂复配后,试样腐蚀电位明显正移,腐蚀电流密度降低,滞后效应大幅减弱,消泡剂有效削弱了起泡剂带来的腐蚀加剧作用;单独添加 0.3%消泡剂时,试样自腐蚀电位正向偏移程度最大,阴阳极电化学反应均受到显著抑制,腐蚀电流密度降至最低,同时滞后环面积最小,材料表面再钝化能力最优,展现出最强的均匀腐蚀抑制能力与抗点蚀性能。

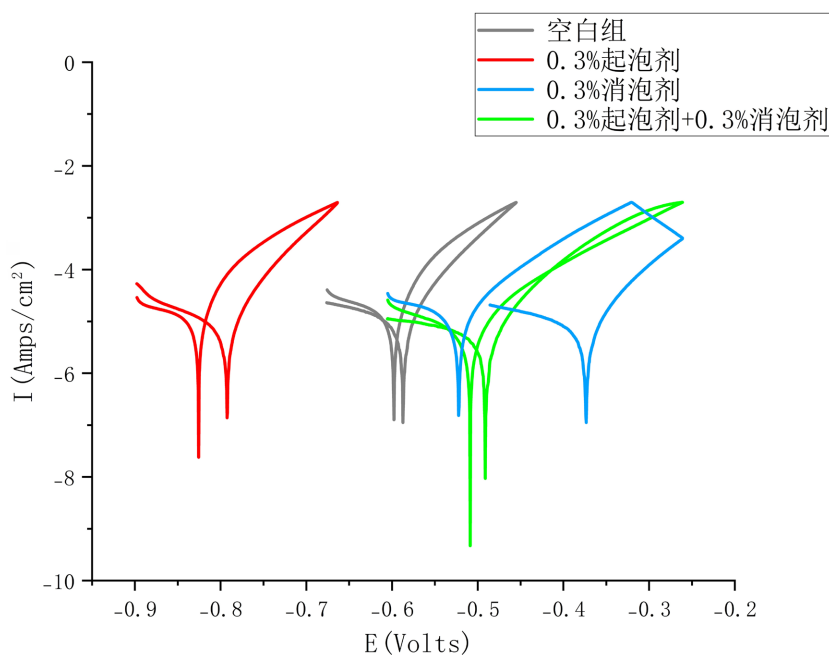


Figure 3. Fitted cyclic polarization curves of L360NS steel in different corrosive media

图 3. L360NS 钢在不同试剂下的循环极化曲线拟合

4. 泡排药剂腐蚀影响机制

4.1. 起泡剂腐蚀促进机制

XHY-4M 非离子表面活性剂型起泡剂分子含亲水极性基团,进入高矿化度模拟地层水后迅速在气-液界面富集并产生大量微泡沫。一方面,起泡剂分子在 L360NS 钢表面发生物理吸附与化学吸附,破坏钢基体表面天然氧化膜与腐蚀产物膜的连续性,形成疏松缺陷结构,降低膜层防护能力;另一方面,泡沫在管道钢表面滞留、聚集,构建闭塞缝隙与氧浓差微电池,这不仅为 Cl^- 的穿透、吸附及富集提供了通道与条件,还会诱发阳极活性溶解,显著降低点蚀击穿电位,加速点蚀萌生与扩展。同时,起泡剂降低腐蚀反应活化能,强化阴极氧还原与析氢过程,提升阳极铁溶解速率,最终大幅加剧均匀腐蚀与局部腐蚀。

4.2. 消泡剂缓蚀机制

XXP-1 有机硅聚醚型消泡剂分子具有强界面铺展性与破泡能力,可快速破坏起泡剂形成的泡沫结构,并且消除表面微泡沫与闭塞微环境,阻断 Cl^- 富集与点蚀诱发路径。消泡剂分子通过疏水作用与范德华力在 L360NS 钢表面形成致密、连续的吸附保护膜,阻隔腐蚀介质与钢基体直接接触,增大电荷转移电阻,抑制阴阳极电化学反应。该吸附膜可稳定填充腐蚀产物膜缺陷,提升膜层完整性与再钝化能力,使腐蚀电位正移、腐蚀电流密度降低,同时提高点蚀击穿电位,增强材料抗局部腐蚀性能,表现出显著缓蚀效果。

4.3. 复配体系协同作用机制

起泡剂与消泡剂复配后,体系呈现竞争吸附与界面调控协同效应。消泡剂优先占据钢表面高活性吸附位点,破坏起泡剂形成的不稳定吸附层,抑制泡沫过度聚集与微电池构建;同时,消泡剂致密吸附膜可抵消起泡剂对膜层的破坏作用,降低腐蚀介质渗透速率。复配体系下,起泡剂的腐蚀促进作用被显著削弱,消泡剂的缓蚀与抗点蚀作用得到保留,腐蚀电位、腐蚀电流密度、阻抗弧半径及滞后环面积均回调至接近空白组的状态,实现排水采气功能与腐蚀防控的动态平衡。

5. 结论与现场建议

5.1. 结论

- 1) 0.3%单一起泡剂会显著降低 L360NS 钢腐蚀电位、提高腐蚀电流密度、减小阻抗容抗弧直径,强烈加剧均匀腐蚀与点蚀风险,是管道腐蚀失效的主要诱因。
- 2) 0.3%单一消泡剂可在钢表面形成致密防护膜,有效抑制阴阳极反应,腐蚀速率降低约 31%,抗点蚀与再钝化能力最优,具备良好缓蚀效果。
- 3) 0.3%起泡剂与 0.3%消泡剂复配时,消泡剂可有效拮抗起泡剂的腐蚀促进效应,使整体腐蚀行为趋近空白组,兼顾排水采气效果与管道防腐安全。
- 4) 泡排剂通过界面吸附、膜层破坏与微环境构建调控腐蚀过程,复配配比是控制集气管道腐蚀风险的关键参数。

5.2. 现场应用建议

- 1) 优化泡排剂加注策略,采用低浓度、间歇式、分段加注,避免起泡剂与消泡剂同时高浓度复配投加,降低药剂拮抗带来的腐蚀加剧风险。
- 2) 单独使用起泡剂时,应配套加注抗点蚀型缓蚀剂,重点防护膜缺陷处氯离子富集诱发的局部腐蚀,并定期对弯头、积液段开展定点测厚与点蚀检测。
- 3) 消泡剂仅作为泡沫调控助剂,不宜单独用作缓蚀剂;复配时适当降低起泡剂比例,利用消泡剂抑制泡沫聚集,减少闭塞腐蚀电池形成。
- 4) 建立泡排剂加注-内腐蚀监测联动机制,实时监测腐蚀速率、点蚀发展与介质离子变化,动态调整药剂配方与加注参数。
- 5) 对管道低洼段、阀门、弯头等易腐蚀部位强化防护,结合定期清管与内检测技术,降低高矿化度采出水与残留药剂造成的局部腐蚀危害。

参考文献

- [1] 姚红生. 南川地区浅层常压页岩气吸附解吸机理与开发实践[J]. 天然气工业, 2024, 44(2): 14-22.
- [2] 杜竞, 陈君, 毛玉昆, 等. 气井温度响应型自消泡智能泡排剂的合成及性能评价[J]. 特种油气藏, 2025, 32(4):

136-142.

- [3] 丛轶颖, 荆玉治. 页岩气集输管道腐蚀原因及控制措施[J]. 腐蚀与防护, 2024, 45(5): 115-120.
- [4] 吴文祥, 徐景亮, 崔茂蕾. 起泡剂发泡特性及其影响因素研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2008, 23(3): 72-75.
- [5] 程雅丽, 付晓恒, 杨晓冉, 等. 浮选起泡剂的研究进展[J]. 煤炭工程, 2017, 49(9): 142-145.
- [6] 李旭成, 郑榕, 郑小林, 等. 泡沫排水采气固体消泡工艺应用现状[J]. 天然气与石油, 2015, 33(5): 27-31.
- [7] 张世红, 胡玉龙, 施岱艳, 等. L360Q 管线钢在 CO₂ 体系模拟气田水中的腐蚀行为[J]. 材料保护, 2016, 49(5): 59-63.