

新型雾化消泡智能加注技术

何天宝^{1*#}, 谢秉宏¹, 张 研¹, 杨 强¹, 黄 霖¹, 张 昶², 李航宇²

¹中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司蜀南气矿, 四川 泸州

²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7日; 录用日期: 2026年6月15日; 发布日期: 2026年7月7日

摘 要

针对页岩气田泡沫排水采气过程中常规雾化装置存在的喷嘴易堵塞、药剂混合不均、用量偏高及自动化程度不足等难题, 研究优化了压力式喷嘴结构参数(孔径1.2 mm、入口角度30°), 提升了高压环境下消泡剂的微米级雾化均匀性; 采用双重密封结构设计, 确保装置在35 MPa高压工况下长期稳定无泄漏; 开发了在线自动定量配液、隔膜式计量泵、冲程调节系统及传感器-云平台-终端三级物联网管控系统, 研制出新型雾化消泡智能加注装置, 实现了消泡剂精准配液、稳定泵注、远程调控与实时监测, 系统响应时间 ≤ 3 s。川南页岩气荣239井、自232井现场试验结果表明: 装置在35 MPa下累计稳定运行182天, 雾化粒径 $D_{50} = 45 \mu\text{m}$ 、均匀性系数 $RSD = 18\%$, 药剂与泡沫液体积比1:1.1时即可实现稳定消泡, 单井消泡剂用量降低45%以上, 药剂接触效率提升至85%以上, 喷嘴堵塞频次显著降低。

关键词

泡沫排水采气, 雾化消泡, 智能加注装置, 隔膜式计量泵, 现场应用

New Atomization Defoaming Intelligent Filling Technology

Tianbao He^{1*#}, Binghong Xie¹, Yan Zhang¹, Qiang Yang¹, Lin Huang¹, Chang Zhang², Hangyu Li²

¹Shunan Gas Field, Southwest Oil and Gas Field Branch, PetroChina Company Limited, Luzhou Sichuan

²School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

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

Abstract

Aiming at the problems of nozzle clogging, uneven mixing of reagents, high dosage, and insufficient

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 何天宝, 谢秉宏, 张研, 杨强, 黄霖, 张昶, 李航宇. 新型雾化消泡智能加注技术[J]. 矿山工程, 2026, 14(4): 897-906. DOI: 10.12677/me.2026.144088

automation in the conventional atomization device in the process of foam drainage and gas recovery in the shale gas field, the structural parameters of the pressure nozzle are optimized. The nozzle aperture is 1.2 mm, and the inlet angle is 30° , which improves the micron-level atomization uniformity of defoamer in a high-pressure environment. The double sealing structure design is adopted to ensure the long-term stability of the device under 35 MPa high-pressure conditions without leakage. An online automatic quantitative liquid dispensing, diaphragm metering pump, stroke adjustment system, and sensor-cloud platform-terminal three-level Internet of Things control system were developed. A new type of atomization and defoaming intelligent filling device was developed, which realized accurate liquid dispensing, stable pumping, remote control, and real-time monitoring of defoamers. The system response time does not exceed 3 ms. The field test results of Rong 239 well and Zi 232 well in southern Sichuan shale gas show that the device runs stably for 182 days under 35 MPa high pressure. The atomization particle size D_{50} is 45 μm , the uniformity coefficient RSD is 18%, and the elimination ratio is 1:1.1. Stable defoaming can be achieved. The amount of single well defoaming agent decreased by more than 45%, the utilization rate of the agent increased to 85%, and the number of nozzle blockages decreased significantly.

Keywords

Foam Drainage Gas Recovery, Atomization Defoaming, Intelligent Filling Device, Diaphragm Metering Pump, Field Application

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

随着四川盆地深层页岩气藏勘探开发的持续推进, 泡沫排水采气工艺因成本低、见效快、适应性强, 已成为气藏开发中后期解除井筒积液、延缓产能递减、实现气井稳产增产的核心技术。消泡环节作为气液分离与下游集输系统安全稳定运行的关键屏障, 其效率直接决定气井产能释放与集输系统可靠性; 消泡剂高效、均匀、精准雾化加注, 是保障消泡效果、降低药剂损耗、避免泡沫翻塔事故的核心前提。因此, 高压工况下消泡剂雾化加注技术与装备优化, 已成为页岩气泡排工艺领域的研究热点与技术攻关重点。

国外页岩气开发(如北美)起步早, 消泡剂雾化加注技术已形成自动化、集成化、标准化的成熟体系: 普遍采用高压柱塞泵 + 压力式喷嘴组合, 耐压等级可达 40~70 MPa, 配套监控系统实现远程监控, 雾化粒径可控制在 10~20 μm , 药剂利用率达 75%~85%。代表性产品如美国 OxyChem 公司的 AutoFoam™ 自动加注系统, 具备稳定性强、加注精度高、高压适应性好等优势, 但设备购置与运维成本高、核心技术封锁、针对中国页岩气井泡沫翻塔等特殊工况适配性差, 难以直接大规模引进应用。

国内方面, 自 2016 年川渝地区页岩气规模开发以来, 泡沫排水采气技术快速发展, 西南油气田、中石化华东油气分公司等单位围绕消泡剂配方、雾化工艺、加注控制等方面开展大量研究: 蒋泽银等(2020)研发 CT5-7C 特种起泡剂, 解决高温高盐环境下泡沫稳定性难题[1] [2]; 周兴付等(2022)提出小产量边远井泡排方法, 优化消泡剂加注位置与配比, 使消泡效率提升至 74.69% [3]; 装备层面, 恒溢公司推出气井自动注剂远程精细控制装置, 支持远程启停与参数配置, 但耐压等级仅 25 MPa, 难以满足深层页岩气 (35 MPa 以上) 高压工况要求; 刘利平等(2025)设计可拆卸式消泡剂喷嘴固定装置, 实现喷嘴快速拆装与维护, 但未解决高压密封与微米级均匀雾化核心问题[4]。

综合来看, 国内现有消泡剂雾化加注装备在高压深层页岩气开发中存在四大核心短板, 严重制约现

场应用效果与气井产能释放:

1) 雾化质量差: 常规压力式喷嘴雾滴粒径多为 50~100 μm , 分散均匀性(变异系数)超过 30%, 药剂与气液两相流接触不充分, 消泡效率低、药剂损耗大(利用率仅 40%~60%);

2) 高压适应性弱: 耐压等级普遍 ≤ 25 MPa, 在 35~45 MPa 高压工况下, 喷嘴易变形、堵塞, 堵塞率高达 28%, 年均泡沫翻塔事故 3~5 次, 严重影响集输系统安全;

3) 加注精度低: 多依赖人工经验调节, 缺乏闭环反馈控制, 加注误差超过 15%, 无法根据气井实时工况(气量、液量、压力)动态优化加注量;

4) 安装维护难: 多采用垂直管道固定式安装, 雾滴扩散半径不足 40 mm, 药剂覆盖范围小; 一旦堵塞, 需关井、放空、拆管线检修, 单井单次检修耗时超 4 h, 严重影响生产时效。

针对现有技术瓶颈与学术空白, 本文以双重密封、药剂高效混匀、不中断连续生产、现场施工便捷为核心目标, 融合隔膜泵技术、物联网智能控制, 研发适用于 35~45 MPa 深层页岩气高压工况的雾化消泡智能加注装置。通过结构设计、性能测试、现场试验验证, 重点突破高压微米级均匀雾化、双重密封防泄漏、隔膜泵精准计量、物联网远程智能管控四大关键技术, 旨在解决常规雾化器雾化质量差、高压适应性弱、加注精度低、维护难等痛点, 实现消泡剂高压、均匀、精准、智能雾化加注, 为深层页岩气藏高效开发提供核心装备支撑, 推动泡沫排水采气工艺向高压化、智能化、高效化升级。

2. 雾化消泡智能加注装置开发

雾化消泡智能加注装置包括雾化、加注及控制系统等三大部分。雾化装置作为核心执行单元, 基于压力喷嘴微米级雾化机理进行结构优化设计, 能够使消泡剂微米级破碎并均匀混入井筒气液两相流体, 且可根据现场集输管线规格灵活更换适配喷嘴型号。加注装置以隔膜式计量泵为核心输送部件, 配合定量配液单元与高压管路密封辅助系统, 可实现消泡剂独立、稳定、精准输送, 有效避免管路杂质侵入与药剂泄漏损耗等问题。控制系统具备运行参数实时调节、工况数据在线记录与历史查询功能, 便于现场工作人员对装置运行状态进行全程监控与精细化管理。

2.1. 雾化装置优化设计

压力喷嘴雾化技术工作原理为: 消泡剂在 30~50 MPa 高压下从喷嘴高速喷出, 受流体剪应力作用液膜破碎为几十至几百微米的微细液滴, 再与管内气液混合物撞击掺混, 实现药剂高效分散与消泡反应快速均匀进行, 既提升药剂利用率, 又强化消泡作业效率。

通过流体力学仿真与室内实验, 发现压力喷嘴孔径为 1.2 mm, 进口角 30° [5], 出口段采用锥形扩散结构, 主体材料选用耐蚀、耐压性能优异的 316 L 不锈钢, 可良好适配高压工况与消泡剂介质特性。

采用可快速拆装结构设计, 配套 1.0 mm、1.2 mm、1.5 mm 三种孔径雾化头, 可根据现场 5~50 L/h 的药剂加注量灵活选配, 同时稳定维持 30~50 MPa 的加注压差, 实现微米级雾化。

采用渐缩-扩张型喷嘴流道设计, 有效降低流体阻力损耗, 将雾滴均匀性系数 RSD 从 30% 以上降至 18%, 显著提升雾化均匀度, 确保药剂与流体充分接触 [6]。

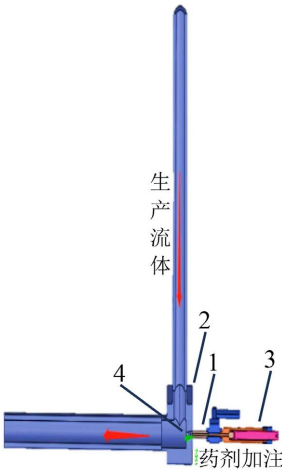
雾化装置处理流量为 5~50 L/h, 能耗低且满足现场规模化加注需求; 工艺流程简单、运维工作量小、VOCs 零排放; 适用粘度范围为 1~1000 cP; 造价低廉, 单套成本约 8000 元。

2.2. 安装方式优化

安装方式采用棒状雾化器与弯头组合, 如图 1 所示。棒状雾化器以法兰固定于管道弯头处, 利用弯头区域天然的气流扰动效应与流场重构作用 [7], 使雾滴在弯头下游迅速扩散。实测雾滴粒径 $D_{10} = 28 \mu\text{m}$ 、 $D_{50} = 45 \mu\text{m}$ 、 $D_{90} = 72 \mu\text{m}$, 粒径均匀性系数 RSD 为 18%, 满足高压工况下药剂高效分散的需求, 雾滴扩

散半径可达 80 mm。该设计彻底解决了常规直管安装模式下雾滴撞壁、附壁聚结的技术难题，使消泡药剂与管内气液流体实现全方位、无死角高效混合，药剂接触效率提升至 85%以上，有效保障井筒内药剂均匀扩散，最终实现气井高效稳定消泡。

管道法兰连接处采用 V 型圈与金属缠绕垫组合的双重密封结构。从剖面看，法兰密封面由内至外依次布置金属缠绕垫(主密封)与 V 型圈(副密封)，形成串联式冗余密封体系。预紧状态下，螺栓力使金属缠绕垫产生初始密封比压，其金属骨架与非金属填料(通常为石墨)相互嵌合，形成致密的迷宫型密封界面；当管内升压至 35 MPa 时，介质压力作用于垫片内侧，进一步增大垫片与法兰槽的接触应力，实现“压力自紧”效果，这是第一重密封。外侧 V 型圈为唇形结构，在介质压力作用下，其唇部张开并紧贴密封槽侧壁，产生随压力升高而增大的自紧力；即便主密封因振动、疲劳或微动磨损出现局部泄漏，V 型圈仍能依靠弹性补偿维持有效阻断，形成第二重密封屏障。从力学角度，该组合将“垫片压缩回弹密封”与“唇形自紧密封”原理耦合，不仅通过双重界面分担压差、降低单道密封失效概率，还具备“破损 - 安全”特性——主密封性能退化时，副密封可单独承受全压差，从而在 35 MPa 高压工况下实现无渗漏、无泄漏，显著提升装置长期运行安全性。双重密封剖面图如图 2 所示。



1. 喷嘴；2. 固定法兰；3. 药剂注入接口；4. 管道弯头。

Figure 1. Rod atomizer + elbow installation diagram
图 1. 棒状雾化器 + 弯头处安装示意图

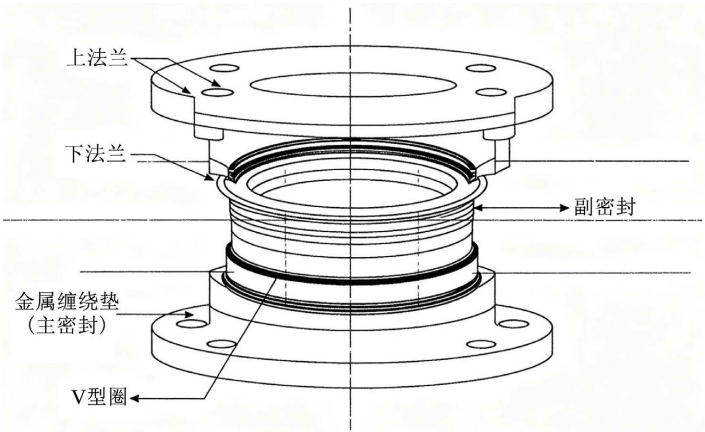
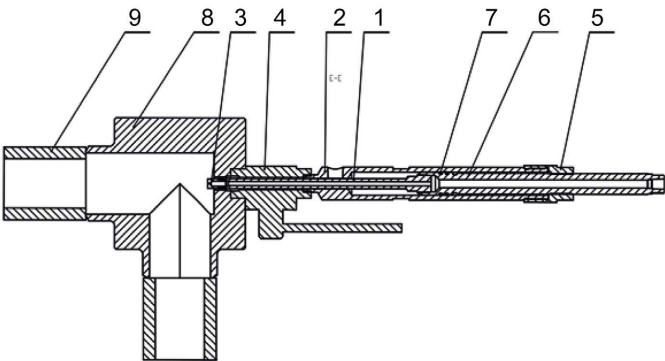


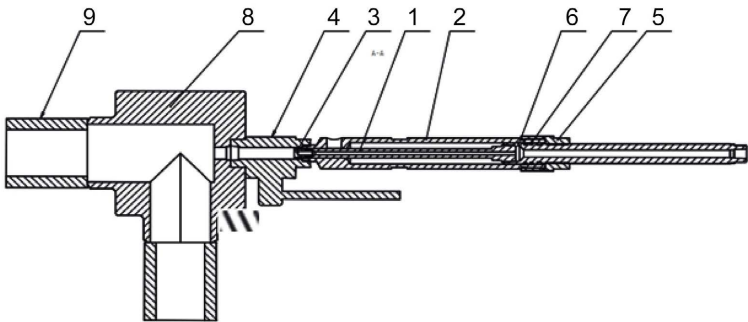
Figure 2. Double sealing profile diagram
图 2. 双重密封剖面图

将雾化器安装于弯头或固定式油嘴处，配套球阀启闭结构；当喷嘴发生堵塞时，可通过关停球阀实现不停产检修[8]，将检修时长压缩至 30 分钟内，有效解决了高压气井药剂雾化加注的工程难题。雾化器工作状态和检修状态如图 3 和图 4 所示。



1. 加长芯轴；2. 外筒；3. 雾化头；4. 球阀；5. 锁紧螺母；6. 芯轴；7. O 型密封圈；8. 弯头；9. 生产管道。

Figure 3. Working state diagram of new atomizer
图 3. 新型雾化器工作状态图



1. 加长芯轴；2. 外筒；3. 雾化头；4. 球阀；5. 锁紧螺母；6. 芯轴；7. O 型密封圈；8. 弯头；9. 生产管道。

Figure 4. New atomizer maintenance state diagram
图 4. 新型雾化器检修状态图

2.3. 配液系统设计

结合气井现场生产工况、运维实操条件及室内雾化试验参数，采用“原液存储 - 精准计量 - 动态混合”三级架构，研发了在线自动定量配液系统[9]。浓度调控范围 3‰~8‰，配液精度达±1%，采用转速 300 r/min 的机械搅拌方式，配套底部防沉淀螺旋桨及液位自动预警功能，低液位自动报警阈值为 50 mm。

同时，配液系统可根据气井生产实时需求，通过泡沫高度传感器反馈信号实现消泡药剂按需精准量化配制，有效规避药剂静置存放超出 24 小时引发的降解、变质、失效问题，全程采用自动化闭环作业模式，无需人工值守干预，能够从配液源头滤除粒径 > 5 μm 的杂质，抑制结垢诱因，喷嘴堵塞率降至 3% 以下，保障了微米级雾化加注系统的长期平稳运行。

2.4. 泵注系统优选

为了适配气井 35 MPa 高压生产工况，优选了 GM-50 型隔膜式计量泵，设备额定承压 40 MPa，适用流量 5~50 L/h。隔膜式计量泵依靠隔膜结构实现药剂与泵体传动部件完全隔离，既防污染、抗介质腐蚀，还能杜绝杂质堵塞加注管路，解决了压力喷嘴雾化器易堵的工程痛点，满足了气井药剂长效连续稳定加

注需求。同时,隔膜式计量泵应用成熟,平均无故障工作时长超过 8000 小时,运行稳定、服役周期时间更长[10]。

GM-50 型隔膜式计量泵单套采购价较常规柱塞泵高出 16%左右,但年维护次数仅需 2 次,远低于柱塞泵的 6 次/年,隔膜使用寿命达 2000 小时,且单次停机损失降低 80%,因此,隔膜式计量泵经全生命周期的综合使用成本较柱塞泵低 22%,能够有效平衡前期采购与后期运维开支,满足气井长效、连续、稳定加注药剂的需求。

2.5. 排量精准控制方式优化

微米级雾化的均匀度与作业效果取决于药剂加注压差稳定可控。以适配雾化工艺为目标,从防堵塞、调控精度、运行可靠性与实用性等方面论证,确定了最优冲程调节方案:采用伺服电机驱动曲柄连杆结构,通过 0~50 mm 冲程调节实现排量精准控制,精度高、可自动化运行,支持远程调参,调控精度达 0.1%,并能依据 10 Hz 压差数据动态匹配药剂排量,雾化压差稳定保持 30~50 MPa,有效降低喷嘴堵塞风险,保障整个雾化系统平稳可靠运行。

冲程调节系统单套造价较高,但年故障率低于 1%,可显著减少检修、停机与药剂损耗的费用,全生命周期性价比比变频调节方案高 18%,可完全满足微米级雾化对精准排量管控需求。

2.6. 数据传输方式优选

为满足现场高频次、稳定化数据传输需求,结合气井现场工况复杂、布线难度大的实际特点,综合考量施工繁简度、全生命周期成本管控及信号传输可靠度等关键设计要素,采用了物联网传输方案。物联网传输系统由数据采集单元、4G/NB IoT 通信单元及云平台组成,无需布设光纤、网线,依托现场物联网信号即可稳定传输压力、流量、浓度、泡沫高度等雾化加注关键参数,数据采集频次达 10 Hz,传输延迟 ≤ 3 s、丢包率 $< 0.5\%$;同时大幅简化现场施工流程,单井布设仅需 4 小时,可省去传统布线与防护相关工序,提高施工效率。

2.7. 系统集成

以适配气田集约化布置要求,综合考量场地条件、操作便捷性与造价管控等因素,优选了空间错位排布的系统集成布局形式。撬装采用 Q235B 碳钢焊接成型,表面防腐涂层耐盐雾腐蚀时长 ≥ 1000 小时,配套管路选用 316 L 不锈钢材质,耐压等级达 40 MPa,可适配气田复杂腐蚀工况与高压作业需求。空间错位布局借助重力辅助进料,有效降低泵体吸程压力,整体尺寸紧凑,单套造价低。

整体采用同平面规整排布设计,使得安装、补液流程简洁高效,管路衔接合理规范,同时预留 ≥ 0.8 m 检修通道,运维便捷。

雾化消泡智能加注装置如图 5 所示。



Figure 5. Atomization defoaming intelligent filling device
图 5. 雾化消泡智能加注装置

雾化消泡智能加注装置的关键参数如表 1 所示：

Table 1. Parameters of atomization defoaming intelligent filling device
表 1. 雾化消泡智能加注装置参数

设计环节	设计方案	主要参数
雾化方式	压力喷嘴雾化	孔径 1.2 mm，入口角度 30°，雾化压力 30~50 MPa
雾化装置	棒状雾化器	长度 350 mm，直径 50 mm，双重密封结构
配液系统	在线自动定量配液系统	浓度 3‰~8‰，配液精度±1%，搅拌转速 300 r/min
泵注系统	隔膜式计量泵	耐压 40 MPa，流量 5~50 L/h，MTBF 8000 小时
调排量方式	冲程调节	调控精度 0.1%，冲程范围 0~50 mm，远程控制
数据传输方式	物联网传输	传输延迟 ≤3 ms，丢包率 <0.5%，采集频率 10 Hz
框架内部结构	空间错位放置	尺寸 4.5 m × 4 m × 2.4 m，Q235B 碳钢材质

3. 耐压性能校验与雾化效果测试

装置组装完成后首先开展基础功能校验，全面检查机具设备的运行状态与核心功能，确保各设备状态达标、功能稳定可靠；分步开展机具耐压测试与雾化效能试验，通过系统测试全面核验机具的耐压性能与雾化效果，确认其各项性能指标符合实验设计要求。

3.1. 耐压试验

为验证微米级雾化装置的耐压性能是否契合气井 35 MPa 高压工况要求，试验以清水为介质，通过系统组装、分级升压、稳压监测及泄压查验的流程开展专项测试[11]。

试验过程中，将微米级雾化装置与手压泵进行集成组装，借助手压泵采用分级升压模式(每级升压 5 MPa，稳压 5 分钟)，逐步升压至 35 MPa，随后在该压力条件下保持稳压 15 分钟；同时利用压力传感器实时追踪系统压力变化，确保试验过程中系统压降 ≤0.1 MPa。

稳压测试结束后进行泄压处理，泄压完成后对微米级雾化装置进行全面查验，结果显示装置外观完好无缺，密封结构稳固可靠，无变形、渗漏等异常迹象，芯轴往复运转正常，往复频率维持在 50 次/分钟，无卡滞现象。

3.2. 雾化效果测试

试验采用激光粒度仪对微米级雾化液滴粒径进行精准检测[12]，同时借助高速摄像机(拍摄帧率 1000 帧/秒)解析雾化形态；试验介质选用现场常用的有机硅类消泡剂，其黏度为 25 mPa·s (25℃)，试验过程中严格管控加注压力为 35 MPa、加注流量为 20 L/h，确保试验条件与现场实际作业工况一致。

试验结果表明，雾化消泡智能加注装置雾化过程中无显著液滴聚结问题，其微米级雾化效能完全达到预设设计诉求，可满足气井现场药剂雾化加注的实际需求。

4. 现场试验

为验证雾化消泡智能加注装置在气井工况下的运行稳定度与消泡成效，2025 年 6 月~8 月，在川南页岩气荣 239 井、自 232 井相继开展现场试验。雾化消泡智能加注装置安装位置如图 6 所示。

为量化评价气井消泡药剂使用效率与消泡匹配效果，本文以消起比(消泡剂用量与泡沫生成量之比)为核心评价指标，明确其定义、计算方法及现场测量方式。



Figure 6. Installation position of atomization defoaming intelligent filling device
图 6. 雾化消泡智能加注装置安装位置

1) 消起比定义

消起比是气井泡排消泡工况下的专用评价参数，指单位时间内消泡剂有效消耗量与气井泡沫起升生成量的比值，用于表征消泡药剂与井内泡沫生成量的匹配程度，可直观反映药剂利用效率、装置雾化加注适配性及现场消泡冗余量。消起比数值越小，代表药剂消耗利用率越高、消泡工艺经济性越好。

2) 计算公式

消起比计算公式如下：

$$K = \frac{Q_x}{Q_q} \tag{3-1}$$

式中： K ——消起比； Q_x ——单位时间消泡剂有效加注消耗量，L/h； Q_q ——单位时间气井泡沫起升生成等效量，L/h。

3) 现场测量方法

试验期间采用实时计量 + 定点观测标定的联合测量方式：通过智能加注装置自带高精度流量计实时采集消泡剂瞬时加注流量与日累计消耗量，精准获取药剂消耗数据；在分离器、返排池固定观测点位，采用标尺定点测量法，定时记录单位时间内泡沫起升高度、泡沫存续时长及泡沫生成体积，折算得到泡沫等效生成量；同步结合气井产气量、工况压力等参数校正，保证消起比计算数据贴合现场真实工况，数据真实有效、可重复性强。

试验过程中采用分阶段递减消泡剂用量的方式，依托远程监控与现场巡检联动的管控模式，精准核定药剂用量、精细调校工艺参数，并通过每日/隔日取样监测的方式跟踪消泡态势，全面核验装置在真实工况下的综合性能。

4.1. 荣 239 井

试验过程中，消起比从初始 1:2.02 逐步下调至 1:1.6、1:1.4、1:1.2、1:1.1 等梯度时，分离器与返排池均无稳定泡沫产生，两项泡沫高度指标均为 0 或远低于预设管控阈值，表明装置在梯度范围内消泡效能稳定；当消起比下调至 1:1 临界值时，现场出现泡排失常现象，分离器与返排池的泡沫高度指标均超出管控标准；将消起比回调至 1:1.1 并同步优化工况后，消泡效果迅速恢复达标，各项指标均完全符合现场管控要求。

试验期间，雾化消泡智能加注装置累计平稳运转 183 天，仅通过 1 次 30 分钟的不停产检修即恢复常态，全程无故障停机记录，运行稳定性突出；与试验前期相比，单井消泡剂日耗量降低了 45.5%，药剂利

用率提升至 86%，堵塞次数平均每月从 8 次降为了 1 次，在降低药剂消耗的同时显著提升了药剂利用效率。

图 7 为荣 239 井消起比 2025 年 1~8 月常规工况下的月度变化趋势。1~3 月指标稳定维持在 2.00，无明显波动；4~6 月指标呈小幅波动下降，由 1.92 降至 1.81；7~8 月指标出现显著回落，分别降至 1.26 和 1.10，整体呈现“平台稳定 - 小幅波动 - 快速下降”的阶段特征。误差棒显示各月度数据离散程度低，测量稳定性良好，为后续试验效果对比提供了可靠的基准工况数据。

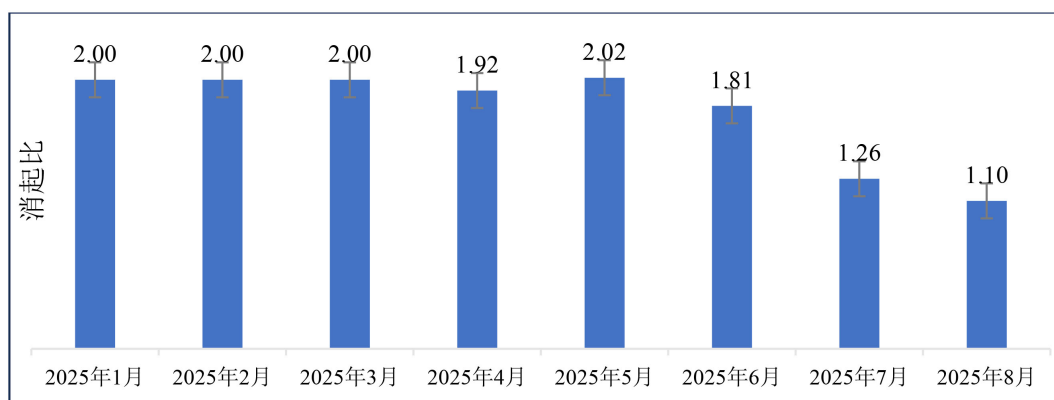


Figure 7. Elimination ratio of Well Rong 239

图 7. 荣 239 井消起比

4.2. 自 232 井

自 232 井原有常规消泡工艺存在消泡效果不佳、泡沫管控不达标等问题，泡沫堆积现象突出，严重影响气井正常连续生产。

2025 年 6 月 18 日起在该井开展雾化消泡智能加注装置现场试验，试验过程中逐步将消起比从 1:2.03 下调至 1:1，同时同步进行取样观测，重点评估现场二次发泡情况。

监测结果表明，在消起比梯度下调的各阶段，分离器与返排池均未出现稳定泡沫，泡沫高度远低于预设管控阈值，且消泡过程快速彻底，同时，消泡剂用量减少了 50.7%，药剂利用率提升至 85%，喷嘴堵塞次数平均每月从 6 次降为了 0 次。目前，自 232 井运行状态平稳，消泡效果持续达标，解决了泡沫堆积影响生产的难题，实现了气井正常连续生产。

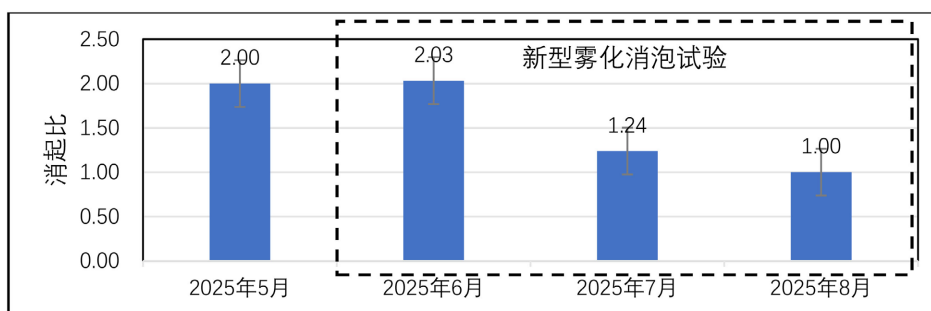


Figure 8. Elimination ratio from Well 232

图 8. 自 232 井消起比

图 8 为新型雾化消泡试验前后关键指标的变化对比。以 2025 年 5 月的 2.00 为试验前基准值，6 月试

验启动初期指标为 2.03, 与基准值基本持平; 随着试验稳定推进, 7~8 月指标分别降至 1.24 和 1.00, 下降幅度较常规工况同期数据进一步扩大。误差棒显示试验阶段数据离散度无显著增加, 表明新型雾化消泡工艺在稳定运行的同时, 对关键指标具有持续优化效果, 且数据可靠性未受影响。

5. 结论与认识

1) 通过优选压力喷嘴雾化 + 棒状雾化器 + 弯头布设的组合模式, 有效攻克了常规消泡工艺中消泡剂混合不均、液滴附壁聚结的工程难题, 显著强化了药剂雾化效果与现场消泡成效。

2) 采用在线自动定量配液、隔膜式计量泵等设备的集成化设计, 实现了雾化装置药剂精准配液、平稳泵注与远程调控的一体化运行, 有效降低了喷嘴堵塞隐患, 大幅提升了装置的智能化运行水准, 适配气田集约化运维需求。

3) 现场试验表明, 雾化消泡智能加注装置在消起比 1:1.1 的工况下可实现长效稳定消泡, 大幅缩减消泡剂耗量、降低生产成本。

参考文献

- [1] 蒋泽银, 李伟, 罗鑫, 等. 页岩气平台井泡沫排水采气技术[J]. 天然气工业, 2020, 40(4): 85-90.
- [2] 蒋泽银, 李伟, 罗鑫, 等. 长宁页岩气井泡沫排水起泡剂优选及现场应用[J]. 石油与天然气化工, 2018, 47(4): 73-76.
- [3] 周兴付, 严小勇, 李芝力, 等. 一种页岩气小产量边远井的泡排方法[P]. 中国专利, CN115539000A. 2022-12-30.
- [4] 刘利平, 兰雪诚, 刘松柏, 等. 一种消泡剂喷嘴的固定装置[P]. 中国专利, CN224121056U. 2026-04-14.
- [5] 王松岭, 甄猛, 吴正人, 等. 压力对喷嘴雾化特性影响的数值模拟[J]. 机械设计与制造, 2020(3): 51-54.
- [6] Yuan, X., Xiao, H., Xu, X., et al. (2026) Flow Field Analysis and Structural Optimization of Pressure Swirl Atomizing Nozzle. *Journal of Mechanical Engineering*, **62**, 377-391. (In Chinese)
- [7] 李杰元, 贾严刚, 赵国军, 等. 注醇雾化器优化及试验[J]. 天然气与石油, 2023, 41(5): 101-110.
- [8] 袁尧辉, 王成勇, 李伟秋, 等. 微量润滑切削用气动雾化器设计及雾化特性研究[J]. 中国机械工程, 2026, 37(4): 837-845.
- [9] 全国石油天然气标准化技术委员会. 页岩气排采工艺技术规范第 3 部分: 泡沫排水: NB/T 11045.3-2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [10] 杨凯, 廖义德, 陈绪兵, 等. SCR 系统高精度隔膜计量泵设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 390-394.
- [11] 石零, 陈文, 杨成武, 等. 小型喷嘴雾化特性的实验研究[J]. 江汉大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 73-79.
- [12] 王磊, 付强, 李越, 等. 双主密封特殊螺纹油管接头密封性能研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2019, 32(3): 58-64.