

# 埕岛油田非酸解堵技术研究及现场实践

齐陆宁, 马贺, 崔伟, 邓燕霞

中国石化胜利油田分公司海洋采油厂, 山东 东营

收稿日期: 2025年6月30日; 录用日期: 2025年8月27日; 发布日期: 2025年9月15日

## 摘要

埕岛油田在开发过程中, 部分生产井出现产液量显著下降, 注水井压力持续升高, 影响了油田的开发效率。分析表明, 储层中的黏土矿物运移、水化膨胀以及注入水中悬浮杂质沉积是导致孔喉堵塞的主要原因。针对这一问题, 结合油田的地质特点及堵塞机理, 开展了室内实验, 开发出一套基于中性超分子解堵技术的解堵体系。实验结果显示, 该体系能显著分散储层中的蜡质、胶质沥青质, 并有效降低界面张力(达到 $10^{-3}$  mN/m)。现场应用于埕岛油田12C注水井后, 注水压力由9.63 MPa降至2.51 MPa, 降幅达73.9%, 吸水指数提升2.5倍, 对应油井日累增油量达12.4吨。研究结果表明, 非酸超分子解堵体系能有效缓解地层堵塞, 具有显著的增产、增注效果, 并在油田开发中具有广泛推广价值。

## 关键词

砂岩油藏, 酸化体系, 非酸解堵, 增产增注, 现场应用

# Research on Non-Acid Blockage Removal Technology and Field Application in Chengdao Oilfield

Luning Qi, He Ma, Wei Cui, Yanxia Deng

Offshore Oil Production Plant, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying Shandong

Received: Jun. 30<sup>th</sup>, 2025; accepted: Aug. 27<sup>th</sup>, 2025; published: Sep. 15<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

During the development of Chengdao Oilfield, some production wells exhibited a significant decline in liquid production, while injection wells experienced continuous pressure buildup, adversely affecting the field's development efficiency. Analysis revealed that the migration of clay minerals, hydration-induced swelling, and deposition of suspended impurities in injected water were the primary

causes of pore-throat blockage. To address this issue, a laboratory study was conducted based on the geological characteristics and blockage mechanisms of the oilfield, leading to the development of a novel neutral supramolecular blockage removal system. Experimental results demonstrated that this system could effectively disperse wax, colloids, and asphaltenes in the reservoir while significantly reducing interfacial tension (reaching  $10^{-3}$  mN/m). Field application in an offshore water injection well (Well A) showed that the injection pressure decreased from 9.63 MPa to 2.51 MPa, a reduction of 73.9%, with the injectivity index increasing by 2.5 times. Correspondingly, the associated oil well achieved a cumulative daily oil production increase of 12.4 tons. The study demonstrates that the non-acid supramolecular blockage removal system can effectively mitigate formation blockages, deliver remarkable stimulation and injection enhancement effects, and holds broad potential for application in oilfield development.

## Keywords

Sandstone Reservoir, Acidizing System, Non-Acid Blockage Removal, Production and Injection Enhancement, Field Application

Copyright © 2025 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

埕岛油田是典型的砂岩油藏，其储层以高河流相沉积为主，横向变化大，非均质性显著。地层矿物成分中，粘土矿物高达比例 12.6%~33.0%，其中岭石、伊利石和蒙脱石等粘土易在注水过程中发生膨胀和迁移，进一步导致渗流能力下降。黏土矿物作为储层内主要的敏感性矿物，其类型、产状和含量等特征决定了储层所具有的潜在敏感性，油田开发过程中需注意预防相应的潜在损害(见表 1)。以埕岛油田 12C 注水井为例，该井 2003 年油转水井作业完井后，首次注水压力 1.2 MPa，但在持续注水过程中，由于堵塞堆积和淤泥土矿物沉积，压力逐渐升高至 9.63 MPa，同时吸水指数下降了约 70%，注水效率大幅降低，传统酸化作业对地层堵塞具有一定效果，但酸液处理存在以下不足[1] [2]：① 酸液对井筒和设备腐蚀恶化，易引发管柱及井下工具损坏；② 深层解堵不足，见效时间短；③ 返排复杂，容易对储层造成二次伤害。因此，需要一种安全高效且对地层友好，对管柱及井下工具腐蚀速率低的解堵技术来解决问题。

Table 1. Clay mineral forms

表 1. 黏土矿物形式

黏土矿物	单体形态	分布方式	敏感性类型	潜在损害
高岭石	书页状、手风琴状、蠕虫状	充填粒间孔隙或少量附于粒表	速敏性	微粒运移堵塞孔喉
蒙脱石	不规则的蜂窝状、絮团状、薄膜状	覆盖于粒表或充填粒间孔隙	水敏性	水化膨胀分散运移
伊利石	片状、丝状	分布于粒表或以孔隙衬边出现	水敏性(弱)、速敏性(弱)	水化膨胀分散运移
绿泥石	针叶状、绒球状、叶片状	充填粒间孔隙且常与石英等矿物共生	酸敏性	溶于酸形成凝胶物

本研究针对油田地层特点, 结合储层样品分析和室内实验, 开发出一套基于中性超分子解堵技术的解堵体系, 并在埕岛油田 12C 注水井中开展现场应用。实验和现场数据均论证, 该技术能够有效分散地层淤积物、恢复渗流能力, 实现注水效率和采油量的双提升, 为类似储层淤积问题的解决提供方向。

## 2. 酸化体系对砂岩油藏的影响

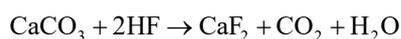
目前馆陶组解堵使用较为广泛的酸化体系为土酸体系, 即浓度为 10%~15%的盐酸和浓度为 3%~8%的氢氟酸与添加剂(如: 缓蚀剂、助排剂、铁离子稳定剂等)所组成的混合酸液, 土酸也常常用于对砂岩地层的处理[3]-[5]。但氢氟酸与地层水中的钙  $\text{Ca}^{2+}$ , 钠  $\text{Na}^+$ 、钾  $\text{K}^+$ 、铵  $\text{NH}_4^+$ 等阳离子相结合, 生成氟硅酸钠和氟硅酸钾均为不溶物质, 会堵塞地层(表 2 化学成分注释表)。因此在土酸处理过程中需要将地层水完全顶替走, 避免其与氢氟酸接触, 对施工要求较高, 且如果井筒内有泥质或有机垢(如胶质、沥青质), 氢氟酸会与其在筒内提前发生反应, 到达处理油层段时影响酸化能力[6]-[11], 虽然能够达到一定的酸化效果, 但保持时间不长, 再次酸化可能会造成地层酸敏反应, 伤害岩石表面润湿性等, 酸化还可能产生次生硫化氢气体。

氢氟酸与砂岩和泥质反应的化学方程式如下:

与地层泥质砂岩(主要成分是硅酸铝钙)



同时, 与碳酸盐作用:



上列反应中所生成的氟化钙和氟化镁沉淀, 在酸液浓度高时, 处于溶解状态, 而当酸液浓度降低后, 即会沉淀, 形成阻塞, 虽然可以通过提高盐酸浓度来保持氟化钙和氟化镁的溶解度[8] [9], 但对注水管柱及井下工具(如封隔器、配水器等)的腐蚀也随之加剧恶化。

## 3. 传统酸化对井下设备腐蚀

近年来, 油田对酸化体系有了不断的认识与新的工艺, 比如运用氟硼酸( $\text{HBF}_4$ )、磷酸( $\text{H}_3\text{PO}_4$ )、以及有机酸液(如: 甲酸( $\text{CH}_2\text{O}_2$ )腐蚀性弱)、缓速酸(如: 稠化酸、乳化酸等), 也运用了许多保护措施(如加入缓蚀剂、铁离子稳定剂、表面活性剂等), 虽然一定程度地保护了油层, 但无论哪种酸液体系都会对井下设备造成一定的腐蚀。目前注水井采用内外镀渗钨油管 + 注水层段不锈钢油管, 镀渗钨油管下井过程中在液压钳咬合时会破坏涂层, 导致咬合位置易腐蚀。如果酸化时酸液处理不干净有残留, 长时间浸泡再加上高压注水会导致腐蚀穿孔, 影响注水效果[10]-[15]。不仅如此, 为提高产能, 对于一些分析出来因地层阻塞造成的低效油井, 也需要解堵措施, 提高产能。但酸化对电泵电缆、井下工况仪、分采管柱等伤害极大, 可能造成躺井风险, 对地面设备、分水仪器、输油管道也会造成不同程度的化学腐蚀、分水困难等[13]-[17] (见图 1)。

## 4. 超分子中性除垢技术

为解决油田地层堵塞问题并克服传统酸化作业的缺点, 提出了基于超分子理论的中性除垢技术。超分子中性除垢技术依托超分子理论发展而成, 该理论通过分子间的非共价相互作用, 描述了分子与分子之间的动态连接与协作行为。技术核心在于通过药剂分子在水中的布朗运动和振动作用, 将金属表面附着的锈垢、结晶垢、油垢、泥垢等各种污垢分散至溶液中, 而不在金属表面留下颗粒残留。



**Figure 1.** Corrosion perforation of tubing caused by acidification

**图 1.** 酸化导致油管腐蚀穿孔

#### 4.1. 除垢原理

超分子中性除垢剂的作用机制包括两个核心步骤:

- 1) 污垢分散: 药剂分子通过物理作用力渗透到污垢结构中, 将其有效分解并分散至溶液中, 适用于多种污垢类型, 包括: 锈垢(氧化铁类沉积物);
- 2) 结晶垢(碳酸钙、硫酸钙等无机矿物结晶物);
- 3) 油垢(胶质、蜡质沥青质沉积物);
- 4) 泥垢(泥沙及悬浮颗粒积聚物);
- 5) 金属保护: 药剂分子与金属表面相互作用, 形成一层致密、平滑的超分子膜, 具有以下功能;
- 6) 防腐蚀: 隔绝腐蚀介质与金属表面的接触, 减少腐蚀损害;
- 7) 防垢堆积: 有效防止新污垢的沉积;
- 8) 自修复性: 膜层在高温高压下具备一定的自修复能力, 确保长期稳定性。

#### 4.2. 技术特点与优势

与传统酸化除垢方法相比, 超分子中性除垢技术具备以下显著优势:

- 1) 高效除垢: 适用于多种类型的污垢, 包括无机垢和有机垢;
- 2) 安全环保: 中性体系对金属设备无腐蚀性, 减少对地层和井筒的二次伤害;
- 3) 施工便捷: 操作简单, 施工过程中无需更换管柱或采用复杂工艺;
- 4) 经济性强: 较低的施工成本和良好的长效性, 降低了油田开发的综合费用。

基于这些特点, 超分子中性除垢技术被用于埕岛油田的埕岛油田 12C 注水井地层解堵中, 以验证其实际效果。

### 5. 技术实验及矿场实践

#### 5.1. 储层特征及井况分析

埕岛油田 12C 注水井位于埕岛中区, 储层以中、细粒岩屑长石砂岩为主, 矿物成分主要为石英、长石、岩屑, 碎屑颗粒分选中等-好。埕岛油田 12C 注水井 P1~P5 层注水储层物性相差较大, 水型为  $\text{NaHCO}_3$  型。该井 2003 年 8 月转注, 初期由于地层渗透性较好, 吸水指数高, 注入压力低; 现阶段渗流能力变差, 吸水指数下降, 注入压力升高, 注入情况如图所示(需要整体数据)。对比分析该井生产历史, 认为该井存在污染和老化油堵塞, 因此计划对该井进行超分子解堵, 增加污水回注能力, 降低注入压力。

## 5.2. 堵塞机理分析

1) 对储层取样分析发现,黏土矿物中泥质占比 12.6%~33.0%,处于较高的水平,储层中的高岭石、伊利石、蒙脱石等敏感型黏土矿物容易发生运移和水化膨胀,进而导致储层孔喉堵塞,降低了近井地带渗透率。

2) 对埕岛油田 12C 注水井注水分析,回注污水中含有颗粒杂质、固相悬浮物、有机杂质以及各种细菌微生物和铁垢等,它们进入地层,造成孔隙喉道堵塞,这些污染物长期积累对回注能力产生显著影响。针对该油田出现的堵塞情况,进行室内实验研究,以提高地层渗透率,增加油田产量。

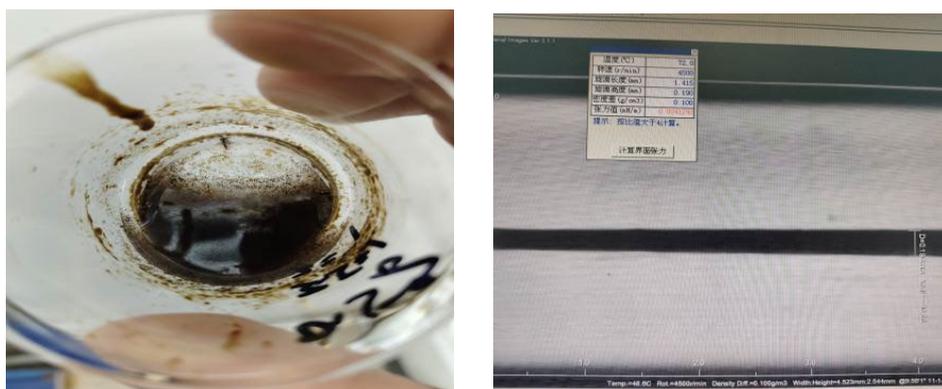
## 5.3. 储层原油清洗剂评价

采用 10%浓度的中性超分子解堵溶液剂,对埕岛油田 12C 注水井注水层中的原油进行分散性能测试。实验测定了解堵剂的界面张力以及对蜡质、胶质沥青质的溶解效果(表 2、图 2)。

**Table 2.** Interfacial tension experiment

**表 2.** 界面张力实验

浓度(%)	界面张力(mN/m)	分散时间(min)	溶解效率(%)
10%	$10^{-3}$	10	85.6



**Figure 2.** Effect of supramolecular plugging removal agent on dispersing crude oil (0 min vs. 10 min)

**图 2.** 超分子解堵剂分散原油效果(0 min vs. 10 min)

图 2 结果表明,超分子解堵剂在 10 分钟内即可将蜡质胶质沥青质分散,其界面张力极低,具备快速的分散能力。

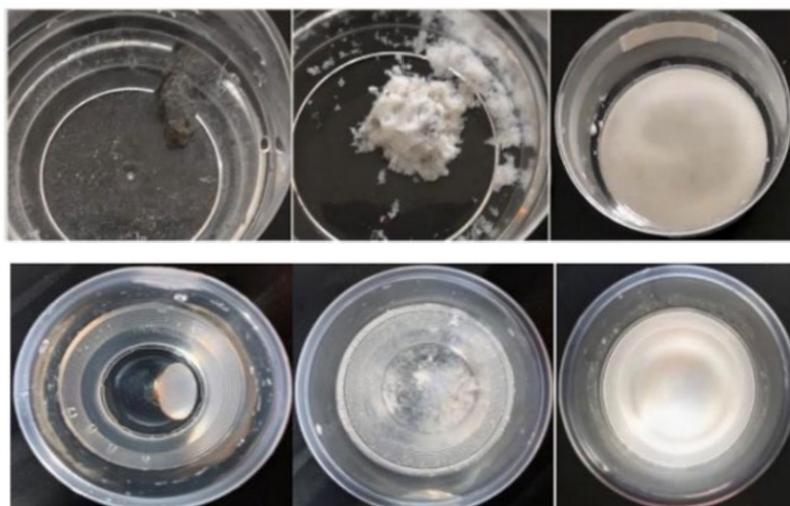
## 5.4. 模拟垢物分散评价

分别采用碳酸钙和硫酸钙阻垢模拟作为实验材料,测试解堵剂的分散效果。实验结果表明:对硫酸钙沉积:金字塔含结晶水,孔隙结构分布,超分子解堵剂能够有效渗透并分散,溶解效率达到 92%。对疏松碳酸钙:贝类碳酸钙其生长间隙仍可被部分渗透分散。分散效果较为显著、溶解率可达 94% (表 3、图 3)。

**Table 3.** Simulation scale dispersion experiment

**表 3.** 模拟垢物分散实验

模拟污垢类型	孔隙率(%)	分散效率(%)
硫酸钙	12.4	92
碳酸钙	2.3	94



**Figure 3.** Effect of supramolecular plugging remover on dissolving calcium sulfate and calcium carbonate  
**图 3.** 超分子解堵剂溶解硫酸钙碳酸钙效果

图 3 进一步展示了解堵剂对模拟淤积物的总体监测效果，表明其适用于分散地层中的大多数无机淤积物质。

### 5.5. 腐蚀速率评价

按照《酸化用缓蚀剂性能试验方法及评价指标》(SY/T 5405-2019)，在地层温度  $65^{\circ}\text{C}$  下测试解堵剂的腐蚀能力。实验中，1%浓度的解堵剂对金属挂片的平均腐蚀速率为  $0.54\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ，远低于标准  $1\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$  (表 4、图 4)。

**Table 4.** Test results of corrosion rate of plugging remover  
**表 4.** 解堵剂腐蚀速率测试结果

浓度(%)	温度( $^{\circ}\text{C}$ )	腐蚀速率( $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ )	限值( $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ )
0.01	65	0.54	1



**Figure 4.** Corrosion rate effect of supramolecular plugging remover  
**图 4.** 超分子解堵剂腐蚀速率效果

### 5.6. 现场应用

本次施工通过注入中性超分子解堵剂，有效渗透并分散了近井地带的悬浮颗粒，同时溶解了由注入

水与地层水反应形成的无机垢(如碳酸钙、硫酸盐等),因而恢复了渗流通道的畅通。施工过程中,还有效抑制了分散的模拟,改变了润湿性,具体消除了水膜现象。施工及效果如下。

施工分为五个段塞,每个段塞均针对不同类型的堵塞物和地层情况设计不同的解堵药剂。该井采用 N80 型  $\phi 73$  mm EU 内外镀渗钨油管,油管全长 1612 m(含油管短节、井下安全阀、同心可调配水器),内径 62 mm,油管容积  $4.9\text{ m}^3$ ;油层套管外径 177.8 mm,油套环形空间容积  $33.3\text{ m}^3$ ;总容积约  $38\text{ m}^3$ ,具体计算公式如下。

通过计算该井洗井需用洗井液约  $60\text{ m}^3$  循环一周,洗井后根据油藏注水需求,分 5 个段塞正挤入 1~5 号解堵剂(参考表 5)。

按照油层井段 2.0 m 处理半径,对地层进行解堵;计算需中性超分子解堵剂为  $157.0\text{ m}^3$ ,解堵药剂总用量 157.0 吨。

**Table 5.** Plugging removal agents for 12C water injection wells in Chengdao Oilfield

**表 5.** 埕岛油田 12C 注水井解堵剂

序号	工序	药剂名称	作用
1	1 号解堵剂	中性超分子解堵剂 40%	解除储层中堆积的悬浮固相颗粒、膨胀运移的黏土矿物
2	2 号解堵剂	降压增注剂 20%	降低注入压力
3	3 号解堵剂	中性超分子解堵剂 10%	持续推进保持第一段塞穿透距离
4	4 号解堵剂	降压增注剂 20%	降低注入压力
5	5 号解堵剂	中性超分子解堵剂 10%	解除近井地带及配水器附近堵塞
顶替水			

## 5.7. 现场应用结果

经过施工后,埕岛油田 12C 注水井的注水压力明显下降,从施工前的 9.63 MPa 降至 2.51 MPa,降幅达到 73.9%。在注水能力得到提升的同时,对应油井累计日增油 12.4 吨,驱水能力得到显著提升。

## 6. 结论

通过现场应用,证明了中性超分子解堵体系在埕岛油田埕岛油田 12C 注水井中的应用效果。该技术不仅能够有效解除储层淤塞,恢复注水能力,还提高了能够油井的产水水平,减少设备损坏的风险,为类似油田的开发提供了可安装的解决方案。未来,补充持续优化解堵剂配方,扩大应用范围,并进行长期的效果跟踪和优化。

(1) 粘土矿物的迁移与膨胀因素,如高岭石、伊利石、蒙脱石等敏感型粘土矿物在注水过程中易发生水膨胀,进而导致储层孔喉堵塞,降低了近井区的渗透性。

(2) 注水污水污染,如回注水中的颗粒细胞、固体悬浮物、有机污染物及破坏等对地层造成了长期积累,严重影响了注水能力。

(3) 超分子解堵剂能快速分散原油中的蜡质和星质,降低表面张力并清除无机垢物(如碳酸钙、硫酸钙),提高了原油的流动性。

(4) 超分子解堵剂安全性高,与传统酸化作业相比超分子解堵体系对井筒和设备无腐蚀作用,避免了酸液引起的设备损坏和深部解堵能力不足的问题。

综上所述,中性超分子解堵技术不仅能够有效解决埕岛油田埕岛油田 12C 注水井的地层堵塞问题,恢复注水能力,还能在不对储层和设备造成二次伤害的前提下,显著提高油田的采收率,该技术具有可靠的应用前景,为类似油田的开发提供了有效的解决方案。

## 基金项目

中国石化集团公司课题“埕岛油田整体注采关键技术研究”,编号 P17031-1。

## 参考文献

- [1] 柳智. 低渗透油藏注水开发酸液体系配伍性研究[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2012.
- [2] 刘冬炎. 土酸酸化的二次伤害分析及相应对策[J]. 清洗世界, 2016, 32(4): 40-44.
- [3] 高强. 耐高温酸液缓蚀剂研制及性能评价[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2023.
- [4] 安俊睿. 用于海上油田油井解堵的新型复合有机酸体系的研究及应用[J]. 能源化工, 2020, 41(1): 45-48.
- [5] 宋丹. 自身 CO<sub>2</sub> 技术体系及驱油效率研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2007.
- [6] 左清泉, 赵军, 郑继龙, 等. 海上 K 油田层内生气调驱技术研究与应用[J]. 应用科技, 2021, 48(5): 99-104.
- [7] 方培林, 权宝华, 杨凯, 等. 金县 1-1 油田可控自生热解堵技术的研究与应用[J]. 天津科技, 2016, 43(10): 117-120.
- [8] 彭建文, 张喜玲, 张婷, 等. 地层自生酸解堵降压增注技术研究[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(12): 227-229, 14.
- [9] 范振忠, 刘庆旺. 注聚井解堵剂的研究与应用[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(1): 217-219.
- [10] 田初明, 刘华伟, 周薛, 等. 海上油田稠油井自生热复合解堵工艺研究[J]. 天津科技, 2017, 44(2): 69-72.
- [11] 张金发. 鄯善油田特低渗砂岩储层潜在伤害及酸液体系研究[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2023.
- [12] 赵军凯, 张云青, 王俊峰, 等. 埕北油田油井解堵技术[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(6): 81-83.
- [13] 张光焰, 张金国, 张云芝, 等. 利用自生气的油气田开发开采工艺技术概况[J]. 油田化学, 2007, 24(3): 272-276.
- [14] 郑继龙. 分子结构对起泡剂泡沫性能的影响[J]. 应用科技, 2021, 48(2): 116-119.
- [15] 郑继龙, 祖健, 翁大丽, 等. 渤海 J 油田 D09h 井连续油管泡沫诱喷复产技术研究[J]. 石油工业技术监督, 2020, 36(8): 9-12.
- [16] 郑继龙, 赵军. 低界面张力起泡剂泡沫性能评价研究[J]. 精细石油化工进展, 2020, 21(6): 24-27.
- [17] 刘中信. 接力式酸降压增注工艺技术的应用[J]. 石油与天然气化, 2004, 33(6): 440-441.