

潜山储层超高温水基完井液体系优选及性能评价

冯桓楷¹, 马英文¹, 吴 怡¹, 王超群², 刁 琪², 杨宇童², 孙 昊²

¹中海油研究总院有限责任公司, 北京

²中海油田服务股份有限公司油田化学事业部油化研究院, 河北 三河

收稿日期: 2025年3月3日; 录用日期: 2025年4月25日; 发布日期: 2025年5月30日

摘 要

基于渤中区域潜山储层特征, 开展了超高温水基完井液体系优选与性能评价。通过对加重盐、抗高温缓蚀剂及防水锁剂的加量优选与完井液体系配方研究。形成了一套抗210℃超高温的水基完井液体系, 该完井液体系配方为: 海水 + 2%助排表活剂STIMFC-1 + 2%抗高温缓蚀剂COROHIB-1 + 25% (质量分数) NaCl。结果表明: 该体系210℃热稳定性良好、表面张力为31 mN/m、界面张力为7.7 mN/m、腐蚀速率为0.012 mm/a, 对储层渗透率恢复率在85%以上。构建的完井液体系能够满足潜山储层高温井完井阶段的技术需求。

关键词

潜山储层, 超高温, 完井液体系, 助排表活剂, 抗高温缓蚀剂

Optimization and Performance Evaluation of Ultra-High Temperature Water-Based Completion Fluid System in Buried Hill Reservoir

Huanzhi Feng¹, Yingwen Ma¹, Yi Wu¹, Chaoqun Wang², Qi Diao², Yutong Yang², Hao Sun²

¹CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing

²Oilfield Chemistry Research Institute, China Oilfield Service Co., LTD., Sanhe Hebei

Received: Mar. 3rd, 2025; accepted: Apr. 25th, 2025; published: May 30th, 2025

文章引用: 冯桓楷, 马英文, 吴怡, 王超群, 刁琪, 杨宇童, 孙昊. 潜山储层超高温水基完井液体系优选及性能评价[J]. 矿山工程, 2025, 13(3): 600-606. DOI: 10.12677/me.2025.133067

Abstract

Based on the characteristics of the buried hill reservoir in the Bozhong area, the optimization and performance evaluation of the ultra-high temperature water-based completion fluid system were carried out. Through the study of the dosage optimization of heavy salt, high temperature corrosion inhibitor and waterproof locking agent and the formulation of the completion fluid system. A set of water-based completion fluid system with 210°C ultra-high temperature resistance was formed. The formula of the completion fluid system is: seawater + 2% cleanup surfactant STIMFC-1 + 2% anti-high temperature corrosion inhibitor COROHIB-1 + 25% (mass fraction) NaCl. The results show that the system has good thermal stability at 210°C, the surface tension is 31 mN/m, the interfacial tension is 7.7 mN/m, the corrosion rate is 0.012 mm/a, and the recovery rate of reservoir permeability is more than 85%. The constructed completion fluid system can meet the technical requirements of high temperature well completion stage in a buried hill reservoir.

Keywords

Buried Hill Reservoir, Ultra-High Temperature, Completion Fluid System, Cleanup Surfactant, Anti-High Temperature Corrosion Inhibitor

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

渤海海域位于渤海湾盆地中部,是中国重要的原油生产基地,渤中凹陷是渤海海域内最大的生烃凹陷,具有巨大的开发潜力,在渤中凹陷西南部的深层-超深层领域相继发现了渤中 19-6、渤中 26-6 等多个大型油气田,储层规模大范围广,构成了多个超亿吨级油田的地质基础[1][2]。

目前,潜山储层是渤中区域勘探战略中的关键一环,包括太古界变质岩/花岗岩、古生界海相碳酸盐岩与中生界碎屑岩/火成岩三种构造层,储层裂缝发育、非均质性强,属高温-超高温储层[3][4]。然而当前缺少成熟稳定的超高温水基完井液体系及技术,例如目前在南海东部、南海西部、新疆塔里木等区块应用的水基以及油基完井液,抗温能力普遍在 120°C~170°C,在渤中 19-6 等区块应用的 HSD 钻井液等抗温能力也普遍在 190°C 以内,难以满足当前渤中区域潜山储层所需要的抗 210°C 超高温[5]-[12];并且在潜山储层保护方面,当前研究往往局限于高温稳定性、沉降稳定性、储保性能等单一性能评价,未对完井液体系性能进行系统性评价以及处理剂加量优选,导致目前潜山储层高温井开发的完井方式受限,相关技术亟待突破,适用于潜山储层的超高温低伤害完井液体系技术缺失[13]-[20]。

本文基于渤中区域潜山储层特征,通过对加重盐、抗高温缓蚀剂及防水锁剂的加量优选与完井液体系配方研究。形成了一套抗 210°C 超高温的水基完井液体系,满足潜山储层高温井完井阶段的技术需求。

2. 实验部分

2.1. 实验材料

(1) 实验用水:海水(实验室配制 2 L,腐蚀、配伍性、储层保护性能评价实验)、配置的氯化镁、氯化钙、碳酸氢钠三种水型的地层水,海水室内配制配方见表 1 所示。

Table 1. Seawater indoor preparation formula
表 1. 海水室内配制配方

无机盐	浓度/g/L
NaCl	21.86 ± 0.01
Na ₂ SO ₄	3.23 ± 0.01
MgCl ₂	4.53 ± 0.01
CaCl ₂	0.93 ± 0.01
KCl	0.64 ± 0.01
NaHCO ₃	0.17 ± 0.01
Na ₂ CO ₃	0.02 ± 0.01

(2) 实验岩心: 根据潜山储层钻井取芯分析结果, 储层渗透率为 3.2~780.1 mD, 孔隙度为 0.7%~27.91%, 储层非均质性较强, 岩心参数见下表 2 所示。

Table 2. Core basic parameters
表 2. 岩心基础参数

岩心编号	岩心长度/cm	岩心直径/cm	孔隙度/%	气测渗透率/mD
119	6.21	2.45	10.57	198.65
120	5.85	2.51	9.86	186.27

(3) 实验药剂: ① 助排表面活性剂 STIMFC-1, 自研药剂, 能够降低水锁效应, 提高低渗原油流动能力的作用, 具有较低的表面张力, 良好的配伍性, 在水中溶解性好, 易配制; ② 抗高温缓蚀剂 COROHIB-1, 自研药剂, 广泛用于完井液体系。在钢材上有很好的成膜性, 从而减轻了对钻完井管材的腐蚀; ③ 加重盐 NaCl。

2.2. 实验仪器

HTYZL-H 型表界面张力仪, 武汉华天电力自动化有限公司; SY-LDY-1 型岩心流动仪, 山东中石大石仪科技有限公司; PFK-250ML 型微型磁力搅拌高压釜, 南京正信仪器有限公司; LXJ-1 型台式离心机; DRGFHX-1 型电热鼓风烘箱。

2.3. 实验方法

(1) 完井液热稳定性能评价: 潜山储层为高温 - 超高温常压系统, 平均埋深 3000~6000 m, 选取实验温度为 210℃ 进行热稳定性能评价, 具体实验步骤为将完井液 210℃ 静态老化 16 h 后, 测试其密度、pH 与老化前对比有无变化。

(2) 完井液防水锁性能评价: 使用表界面张力仪进行完井液防水锁性能评价。

(3) 完井液腐蚀性能评价: 常压静态腐蚀速率及缓释率测定方法, 使用微型磁力搅拌高压釜进行完井液腐蚀性能评价。

(4) 完井液配伍性能评价: 将完井液与三种水型的地层水以不同比例混合, 在 210℃ × 3 d 下测定混合后的溶液配伍情况: 观察比色管中混合溶液的状态, 若溶液混合后无沉淀且浊度 < 30 NTU 则判定为配伍性良好, 否则配伍性较差。

(5) 完井液抑制性能评价: 用离心法评价完井液抑制黏土膨胀的性能。

(6) 完井液储层保护性能评价：将岩心烘干后抽真空饱和地层水，测试岩心的初始油相渗透率，反向注入 2 PV (孔隙体积) 210℃静态老化后的完井液，岩心在夹持器中静态损害 24 h；取出岩心，再次测试其油相渗透率，得到渗透率恢复值。

3. 结果与讨论

3.1. 完井液加重盐优选

一般情况下，盐水完井液使用海水或者淡水配制，添加水溶性的处理剂，常用的加重盐包括氯化钠、氯化钾、氯化钙、甲酸钠、甲酸钾、溴化钠、溴化钙和溴化锌等，根据潜山储层特征与现场施工要求，完井液选择 NaCl 作为加重盐，加重盐基本性能及特点见表 3 所示。

Table 3. Basic properties and characteristics of weighting salt

表 3. 加重盐的基本性能及特点

盐的种类	加重密度/g/cm ³	特点
KCl	1.01~1.16	抑制性好
NaCl	1.01~1.2	来源广泛 价格低廉
HCOONa	1.01~1.32	易潮解
CaCl ₂	1.01~1.39	价格低廉，但需预防沉淀
HCOOK	1.20~1.55	综合性能好，价格偏高
CaBr ₂	1.01~1.81	价格较高
ZnBr ₂	1.80~2.4	腐蚀风险大，不环保

3.2. 完井液防水锁剂加量优选

为满足潜山超高温储层保护与完井工艺需求，在 210℃老化实验条件下实验结果如图 1 所示。

可见，随着助排表活剂 STIMFC-1 加量增加，表界面张力降低，当加量达到 2%时，再增加 STIMFC-1 加量，表界面张力降低幅度很小，因此优选完井液中 STIMFC-1 的加量为 2%。

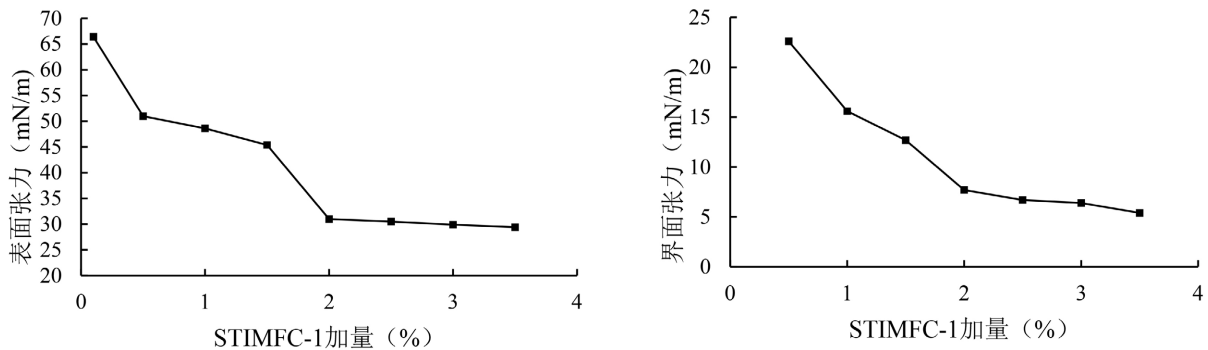


Figure 1. The influence of STIMFC-1 dosage on the waterproof locking performance of completion fluid; (a) surface tension; (b) interfacial tension

图 1. STIMFC-1 加量对完井液防水锁性能的影响；(a) 表面张力；(b) 界面张力

3.3. 完井液抗高温缓蚀剂加量优选

完井液加重盐为 NaCl，在 210℃腐蚀实验条件下测试不同加量的抗高温缓蚀剂 COROHIB-1 对 N80-

13 Cr 钢材腐蚀速率的影响, 实验结果如图 2 所示。

可见, 随着抗高温缓蚀剂 COROHIB-1 加量增加, 腐蚀速率降低, 当加量达到 2%时, 达到行业标准腐蚀速率小于 0.076 mm/a 的指标要求, 再增加 COROHIB-1 加量, 腐蚀速率基本不变, 因此优选完井液中 COROHIB-1 的加量为 2%。

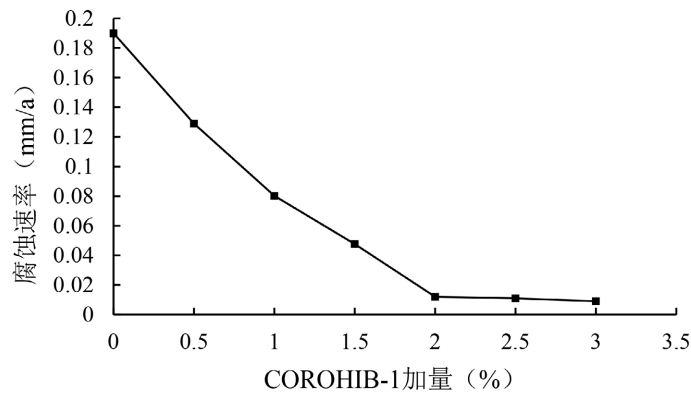


Figure 2. Effect of COROHIB-1 dosage on the corrosion performance of completion fluid
图 2. COROHIB-1 加量对完井液腐蚀性能的影响

3.4. 完井液配方及基础性能评价

基于完井液加重盐优选、防水锁剂与抗高温缓蚀剂加量优选, 完井液体系配方为: 海水 + 2%助排表面活性剂 STIMFC-1 + 2%抗高温缓蚀剂 COROHIB-1 + 25% (质量分数) NaCl, 在 210℃实验条件下进行热稳定性及其他基础性能评价, 结果如表 4 所示。

该完井液体系 210℃条件下热稳定性能良好, 防膨率为 98%、表面张力为 31 mN/m、界面张力为 7.7 mN/m、腐蚀速率为 0.012 mm/a, 可满足潜山储层高温井完井阶段的技术需求。

Table 4. Basic performance evaluation of completion fluid
表 4. 完井液基础性能评价

密度(g/cm ³)	pH	防膨率/%	表面张力 mN/m	界面张力 mN/m	腐蚀速率 mm/a
1.20	8	98	31	7.7	0.012

3.5. 完井液与地层水配伍性评价



Figure 3. Completion fluid and formation water compatibility evaluation results (after 3 days)
图 3. 完井液与地层水配伍性评价结果(3 d 后)

为防止构建的完井液体系与地层水不配伍产生结垢损害，在 210℃实验条件下按完井液与地层水体积比分别为 0:10、3:7、5:5、7:3、10:0 混合后，从初始到 3 天的不同时间，混合液均呈现澄清透明状态，未浑浊或产生沉淀，如图 3 所示，说明完井液与地层水具有良好的配伍性。

3.6. 完井液储层保护性能评价

在 210℃老化的实验条件下开展完井液储层保护性能评价，结果如表 5 所示。完井液污染岩心后，渗透率恢复率 > 85%，完井液储层保护性能优异。

Table 5. reservoir protection performance evaluation results
表 5. 储层保护性能评价结果

岩心编号	初始渗透率/mD	损害后渗透率/mD	渗透率恢复率/%
119	20.56	18.94	92.12
120	19.45	17.78	91.41

4. 结论

(1) 基于完井液处理剂优选，形成了一套抗 210℃超高温的水基完井液体系，配方为：海水 + 2%助排表面活性剂 STIMFC-1 + 2%抗高温缓蚀剂 COROHIB-1 + 25% (质量分数) NaCl。

(2) 结合潜山超高温储层特征开展了完井液综合性能评价，结果表明：该完井液体系具有腐蚀速率低、表界面张力低、与地层水配伍性好、储层保护性能优异等特点，能够满足潜山储层高温井完井阶段的技术需求。

参考文献

[1] 徐长贵, 杨海风, 王飞龙, 等. 渤海湾盆地海域深层——超深层大型复合潜山油气藏形成条件[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(6): 1227-1239.

[2] 赵贤正, 金凤鸣, 王权, 等. 渤海湾盆地牛东 1 超深潜山高温油气藏的发现及其意义[J]. 石油学报, 2011, 32(6): 915-927.

[3] 许鹏, 牛成民, 李慧勇, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷西南部变质岩潜山裂缝型储层特征及主控因素[J]. 矿产勘查, 2022, 13(4): 418-427.

[4] 薛永安, 李慧勇. 渤海海域深层太古界变质岩潜山大型凝析气田的发现及其地质意义[J]. 中国海上油气, 2018, 30(3): 1-9.

[5] 王滨, 朱海峰, 冯恒椿, 等. 乌干达 KF 油田完井液体系优选及性能评价[J]. 精细石油化工进展, 2024, 25(2): 11-15.

[6] 王晋玲, 赵峰, 唐洪明, 等. LF15-1 油田 ZJ10 灰岩储层 PRD 钻完井液体系优化研究[J]. 现代化工, 2016, 36(8): 84-87.

[7] 简成, 孟文波, 罗鸣, 等. 涠洲 12-1C 平台调整井储层损害分析与完井液体系优化[J]. 化学与生物工程, 2021, 38(10): 62-68.

[8] 王昌军, 王正良, 罗觉生. 南海西部油田低渗透储层防水锁技术研究[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(9): 113-115, 168.

[9] 王迎涛. 抗高温水基钻完井液作用机理及性能评价[J]. 当代化工, 2024, 53(4): 910-913, 920.

[10] 曹波波, 张伟国, 金颖, 等. 南海东部某水下开发油田长效完井液技术[J]. 石化技术, 2024, 31(5): 243-245.

[11] 谢涛, 张磊, 杜明亮, 等. 悬浮稳定关键材料及超高温长效稳定油基钻完井液[J]. 钻井液与完井液, 2024, 41(6): 728-735.

[12] 谢建辉, 张丽宁, 杨晓军, 等. 塔里木山前区块油基完井液高温沉降稳定性技术[J]. 自动化应用, 2023, 64(7): 241-244.

- [13] 薛小东, 张晓瑞. 抗高温高密度水基完井液沉降稳定性实验分析[J]. 当代化工, 2022, 51(7): 1738-1742.
- [14] 杨海军, 张家旗, 程荣超, 等. 抗高温油基完井液静沉降稳定性研究及应用[J]. 应用化工, 2022, 51(S1): 299-302.
- [15] 蔡润峰, 陈卓, 张磊, 等. 渤中构造储层保护技术体系及应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(5): 196-198.
- [16] 杨一凡, 邱正松, 李佳, 等. 渤中 19-6 深部潜山高温气层保护钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(4): 476-481.
- [17] 徐运波, 于雷, 黄元俊, 等. 抗高温无固相钻井液在埕北潜山油藏的应用[J]. 中国石油大学胜利学院学报, 2020, 34(1): 33-40.
- [18] 李云峰, 徐吉, 徐小峰, 等. 南堡 2 号构造深层潜山水平井钻井完井技术[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(2): 10-16.
- [19] 卢淑芹, 姜薇, 陈金霞, 等. 南堡潜山油气层钻井完井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2015, 32(6): 18-21, 104.
- [20] 范振华, 魏剑飞, 张珂, 等. 致密砂岩储层高效钻完井液体系优化[J]. 石化技术, 2022, 29(12): 114-116, 6.