

一种井壁稳定剂SACA-1的合成与性能评价

艾 昆

中石化华北石油工程有限公司, 河南 郑州

收稿日期: 2024年12月25日; 录用日期: 2025年2月24日; 发布日期: 2025年3月11日

摘 要

在石油与天然气钻探过程中, 如何保证破碎性地层的稳定一直是困扰钻井领域的一大技术难点。由于破碎性地层的特殊性, 钻井过程中30%左右的井壁失稳问题发生在破碎性地层。室内选择N-乙烯基吡咯烷酮、2-丙烯酰胺基2-甲基丙磺酸(AMPS)、二甲基二烯丙基氯化铵、r-丙烯酸脂丙基三甲氧基硅烷等单体, 优化合成条件, 单体质量比4:2:1:1, 单体浓度为30%, 反应时间为4 h, 反应温度为60℃, 引发剂(过硫酸钾/亚硫酸氢钠)加量为0.5%, 反应pH为8~9, 合成了一种适合于破碎性地层的井壁稳定剂。对其分子结构进行了表征, 分析了作用机理。性能评价结果表明, 井壁稳定剂SACA-1抗温达到220℃, 现场岩屑在3% SACA-1溶液中的热滚回收率为80.03%; 在空气与水中联接后抗剪切强度分别为0.301 MPa和0.206 MPa, 单轴抗压强度为8.47 MPa, 3% SACA-1加入至聚磺钻井液和KCl-聚合物钻井液后, 性能稳定, 热滚回收率分别为85.8%和88.7%, 对于破碎性地层有较好的稳定效果。

关键词

破碎性地层, 井壁垮塌, 防塌钻井液, 井壁稳定剂, 合成

Synthesis and Performance Evaluation of a Borehole Stabilizer SACA-1

Kun Ai

Technical Service Company, Sinopec North China Petroleum Engineering Co., Ltd., Zhengzhou Henan

Received: Dec. 25th, 2024; accepted: Feb. 24th, 2025; published: Mar. 11th, 2025

Abstract

In the process of oil and gas drilling, how to ensure the stability of fractured formations has always been a major technical difficulty in the drilling field. Due to the particularity of fractured

formations, about 30% of the borehole instability problems occur in fractured formations during the drilling process. N-vinylpyrrolidone, 2-acrylamide 2-methylpropanesulfonic acid (AMPS), dimethyldiallylammonium chloride, r-acrylate propyltrimethoxysilane and other monomers were selected indoors, and the synthesis conditions were optimized, the monomer mass ratio was 4:2:1:1, the monomer concentration was 30%, the reaction time was 4 h, the reaction temperature was 60°C, the initiator (potassium persulfate/sodium bisulfite) was 0.5%, and the reaction pH was 8~9, and a borehole stabilizer suitable for fractured formations was synthesized. Its molecular structure was characterized and the mechanism of action was analyzed. The performance evaluation results show that the temperature resistance of the borehole stabilizer SACA-1 reaches 220°C, and the thermal recovery rate of on-site cuttings in 3% SACA-1 solution is 80.03%. After the connection between air and water, the shear strength is 0.301 MPa and 0.206 MPa, the uniaxial compressive strength is 8.47 MPa, and the performance is stable after 3% SACA-1 is added to the polysulfur drilling fluid and KCl-polymer drilling fluid, and the recovery rate of thermal roll is 85.8% and 88.7%, respectively, which has a good stability effect on the fractured formation.

Keywords

Fractured Formations, Borehole Collapse, Anti-Collapse Drilling Fluid, Borehole Stabilizer, Synthesis

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

破碎性地层是从黏土到板岩的一大类海相或湖相沉积岩的总称, 主要由黏土矿物和非黏土矿物组成。研究表明 90% 以上的井塌发生在泥页岩地层, 其中破碎性泥页岩地层约占三分之一, 严重制约了油气田勘探开发的发展。对破碎性地层的物质组成、微观结构、理化性能分析的研究最终目的是弄清楚井壁不稳定的机理。在破碎性地层失稳研究的初期, 人们认为泥页岩井壁失稳主要是由于泥页岩中含有易膨胀性的黏土所致, 进入 20 世纪 80 年代以来人们逐渐加深了对破碎性泥页岩的研究, 认识到微裂缝的扩张效应是导致地层失稳的根本原因, 为此优选了几种单体, 合成了一种适合于破碎性地层井壁稳定剂, 增强破碎性地层的胶结能力, 以期减少破碎性地层的垮塌, 提高油气钻探成功率[1]-[6]。

2. 井壁稳定剂 SACA-1 的合成与表征

选择 N-乙烯基吡咯烷酮作为反应主单体, 引入 2-丙烯酰胺基 2-甲基丙磺酸(AMPS)、阳离子单体二甲基二烯丙基氯化铵、有机硅单体 r-丙烯酸脂丙基三甲氧基硅烷, 提高合成产品的抗温、抗盐性及稳定井壁的能力。选择氧化还原体系过硫酸钾 - 亚硫酸氢钠作为本聚合反应的引发剂[7]-[11]。

首先确定单体质量浓度为 30% 左右、pH = 8~9, 采用正交实验方法, 选取以下四种单体合成目标产物, 单体质量比 A {m (N-乙烯基吡咯烷酮):m (AMPS):m (二甲基二烯丙基氯化铵):m (r-丙烯酸脂丙基三甲氧基硅烷)}、反应时间 B (h) 为 2、4、6 h; 反应温度 C (°C) 为 60°C、80°C、90°C; 引发剂加量(以单体总质量为基准) D (%) 为 0.5%、1.0%、1.5%。构建四因素三水平正交实验表, 其原则是在单因素实验的基础上进行合理的确定, 以岩屑热滚回收率为指标分析合成的井壁稳定剂的最佳条件, K1~K3 为各因素水平热滚回收率的平均值。

Table 1. Optimal orthogonal experiments for synthesis conditions
表 1. 合成条件优选正交试验表

T 序号	因素				热滚回收率(%)
	A	B	B	D	
1	8:4:1:1	6	90	1.5	82.5
2	8:4:1:1	4	80	1.0	85.3
3	8:4:1:1	2	60	0.5	84.9
4	8:6:2:1	6	80	0.5	83.6
5	8:6:2:1	4	60	1.5	87.1
6	8:6:2:1	2	90	1.0	85.5
7	4:2:1:1	6	60	1.0	86.4
8	4:2:1:1	4	90	0.5	89.8
9	4:2:1:1	2	80	1.5	84.9
K ₁	84.233	84.167	85.933	84.833	
K ₂	85.400	87.400	84.600	85.733	
K ₃	87.033	85.100	86.133	86.100	
R	2.800	3.233	1.533	1.267	

从表 1 可以看出，热滚回收率最高的分别是 A3、B2、C3 及 D3，从极差可以看出，四个因素对热滚回收率的影响顺序为 B > A > C > D，B 是影响井壁稳定剂性能的主要因素。由此确定最优合成条件为：单体质量比 4:2:1:1，单体浓度为 30%，反应时间为 4 h，反应温度为 60℃，引发剂(过硫酸钾/亚硫酸氢钠)加量为 0.5%，反应 pH 为 8~9。

采用 Nicolet 公司的 Magna-IR 560 型傅里叶变换红外光谱(FT-IR)对井壁稳定剂进行表征。将制备好的井壁稳定剂用丙酮洗涤，然后与 KBr 混合、研磨、压片，并使用傅里叶红外光谱仪对其进行测试，结果如图 1 所示，图 2 为合成的样品。

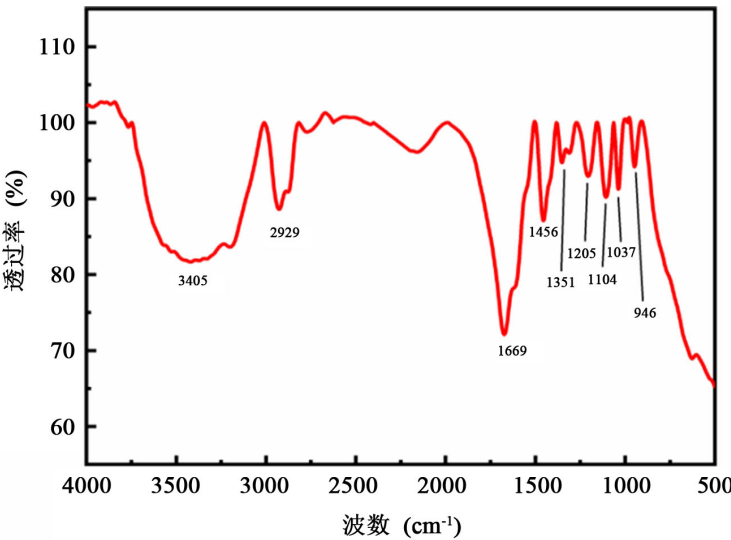


Figure 1. Infrared spectra of borehole stabilizer SACA-1
图 1. 井壁稳定剂 SACA-1 的红外光谱图

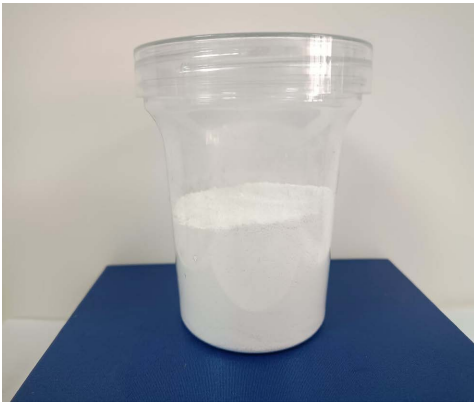


Figure 2. Samples synthesized in the chamber
图 2. 室内合成的样品

由图 1 可知， 3405 cm^{-1} 处是非缔合酰胺基中 N-H 的伸缩振动峰， 2929 cm^{-1} 处是 $-\text{CH}_2-$ 的伸缩振动峰， 1669 cm^{-1} 处为 C=O 伸缩振动峰， 1456 cm^{-1} 处对应于 C-N 的伸缩振动吸收峰； 1351 cm^{-1} 处是 C-N 的伸缩振动峰， 1104 cm^{-1} 处是 $-\text{SO}_3-$ 的不对称伸缩振动峰， 1037 cm^{-1} 处是对应 $-\text{Si-O-C}-$ 伸缩振动吸收峰， 946 cm^{-1} 处是 $-\text{OH}$ 的伸缩振动峰，说明合成产物与目标产物一致。

采用 Versa ThermHm TGA 型的分析热重仪对破碎性地层井壁稳定剂 SACA-1 进行表征分析，测量温度范围 $25^{\circ}\text{C}\sim 450^{\circ}\text{C}$ ，加热梯度为 $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，测试氛围为高纯氢气。

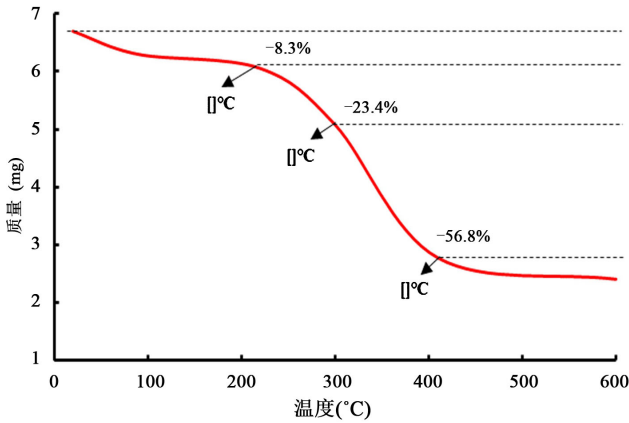


Figure 3. TG-DTG curve of borehole stabilizer SACA-1
图 3. 井壁稳定剂 SACA-1 的 TG-DTG 曲线

由图 3 可知，当温度为 220°C ，对应的 DTG 曲线出现一个吸收峰，失重率仅为 8.2%，在 $220^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ 范围内，井壁稳定剂 SACA-1 的质量快速下降，该阶段主要为醚键和支链的断裂；在此阶段， CONH_2 ， $-\text{SO}_3-$ ， $-\text{C}=\text{O}$ 等强极性基团，失去结合水所致，其失重率为 23.4%，在 $300^{\circ}\text{C}\sim 410^{\circ}\text{C}$ 范围内，主要为主链断裂，此时失重率为 56.8%，表明研制的井壁稳定剂的抗温能力达到 220°C ，满足超深井钻探的要求。

3. 井壁稳定剂 SACA-1 的性能评价

3.1. 泥饼薄片径向膨胀试验

室内用径向膨胀试验法初步探讨了 SACA-1 的稳定井壁的性能，并与一些现场常用的井壁稳定剂进

行了对比。其方法是先将杭锦旗 J58P47 井的现场岩样在 $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 下烘干，并粉碎，过 200 目的分样筛，称取 1.00 g 岩屑粉，置于直径为 20.0 mm 铁环中，在 20.0 MPa 压力下恒压 3 min，以压成规则的泥饼薄片[12]-[18]。试验时，将小泥饼薄片置于待测液中，观察小泥饼薄片在不同时刻下的膨胀直径 d，并计算径向膨胀率 DW。试验结果见表 2。

Table 2. The results of swelling after 24 hours of soaking in the treatment solution
表 2. 处理剂溶液浸泡 24 小时膨胀结果

处理剂	1.5%处理剂溶液浸泡		3%处理剂溶液浸泡	
	d/mm	D _w /%	d/mm	D _w /%
NH ₄ PAN	28.4	42.0	24.5	22.5
FA-367	30.3	51.5	26.9	34.5
K-PAM	24.7	23.5	23.5	17.5
KCl	34.3	71.5	33.4	67.0
K ₂ SiO ₃	33.8	69.0	30.5	52.5
MMH 正电胶	29.5	47.5	28.3	41.5
SACA-1	23.1	15.5	22.6	13.0

由表 2 可知，在相同浓度下，室内压制的薄泥饼在 1%和 3% SACA-1 中浸泡 24 h 的径向膨胀率分别为 23.1%、13.0%，均低于一些现场上常见的聚合物和无机盐井壁稳定剂。

3.2. 热滚回收试验

在室内用改进型的热滚分散试验法进一步探讨了 SACA-1 的稳定性能。试验时，先将岩样小心砸碎，过孔径为 20 目的分析筛，置于有一杯水的干燥器中备用，以保持岩样含水量的一致性。热滚试验的条件为：温度 200°C ，时间 16 h，岩样重量 30.00 g，热滚后用 40 目分样筛筛去破碎岩屑，将筛余所得岩屑洗净后，置于烘箱中在 $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干 4 h，称重，计算岩样的热滚回收率，试验结果见表 3 (其中，WR 为回收岩样重，R 为热滚回收率)。

Table 3. Evaluation results of on-site rock chip hot roll recovery
表 3. 现场岩屑热滚回收率评价结果

处理剂	1.5%溶液热滚回收率		3%溶液热滚回收率	
	W _R /g	R/%	W _R /g	R/%
NH ₄ PAN	17.87	59.56	20.32	67.67
FA-367	18.11	60.36	21.01	70.03
K-PAM	18.97	62.23	21.64	72.13
SAS	15.32	51.06	17.97	59.90
KCl	11.43	38.10	12.34	41.13
K ₂ SiO ₃	12.12	40.40	13.69	45.63
MMH 正电胶	14.24	47.46	18.69	62.30
SACA-1	20.15	67.17	24.01	80.03

由表 3 可知，在含有不同的浓度 1.5%和 3%的处理剂溶液中，现场岩屑在 SACA-1 溶液中的热滚回收率最大，分别为 67.17%、80.03%，其次为 KPAM，热滚回收率为 62.23、72.13%，表明研制的井壁稳定剂 SACA-1 稳定井壁的效果良好。

3.3. 现场岩屑在空气、水中联接抗剪切强度

首先将研制的井壁稳定剂 SACA-1 涂覆于岩石联接的表面上，并将联接试样置于 5 MPa 的压力下压制 2 h，然后分别放置在 20℃ 的空气中、90℃ 的水中，静置 24 h，最后在试样的联接面上施加纵向拉伸力，评价试样在空气和水中能承受的最大负荷，联接面上的平均剪应力为实际的联接抗剪强度[3] [19]-[22]。

表 4 为不同处理剂作用后的联接抗剪强度测试结果。结果表明，SACA-1、SAS、FA-367 和 KPAM 在空气中的联接抗剪强度较高，SACA-1 在水中联接抗剪强度最高，达到 0.206 MPa，其余相对较小。图 4 为现场岩样使用 SACA-1 联结前后的效果对比图。

Table 4. Shear strength test of core connection after the action of different treatment agents

表 4. 不同处理剂作用后岩心联接抗剪强度测试

溶液	联接抗剪强度/MPa		溶液	联接抗剪强度/MPa	
	空气中	水中		空气中	水中
3% SACA-1	0.301	0.206	3% KPAM	0.173	0.122
3% FA-367	0.228	0.174	3% SAS	0.218	0.163
3% NH ₄ PAN	0.190	0.132	3%羟基氯化铝	0.144	0.107



(The left image is the unconnected photo, the right image is the photo after the connection)
注：(左图为未联结的照片，右图为联结后的照片)

Figure 4. Comparison of the on-site core before and after using SACA-1
图 4. 现场岩心使用 SACA-1 联结前后的对比照片

3.4. 岩心单轴抗压强度测试

将杭锦旗 J58P47 井岩样置于不同介质中浸泡 24 h，小心取出，室温条件下自然风干后，置于三轴应力试验台架上，测试其抗压强度，结果见表 5 所示。

Table 5. Compressive strength of cores after soaking in different media for 24 h
表 5. 岩心在不同介质中浸泡 24 h 后的抗压强度

处理剂	单轴抗压强度 /MPa	抗压强度下降 率/%	处理剂	单轴抗压强度 /MPa	抗压强度下降率 /%
J58P47 井岩样	11.63		3% FA367	7.11	38.87
清水	4.23	63.63	3%羟基氯化铝	6.25	46.26
1.5% SACA-1	6.34	45.49	3% KPAM	7.39	36.46
3% SACA-1	8.98	22.79	3%磺化沥青	7.87	32.33
3% MMH 正点胶	6.15	47.12	3% NH4PAN	6.03	48.15

表 5 可知，干燥岩样的单轴抗压强度为 11.6 MPa，清水浸泡后抗压强度下降至 4.23 MPa，下降幅度为 63.63%。经过不同的化学剂处理后，岩样的抗压能力有不同程度提高，其中 3% SACA-1 的作用后效果最为明显，抗压强度达到 8.98 MPa，抗压强度下降幅度仅为 22.79%，其次为 3% SAS，抗压强度下降幅度为 32.33%，表明 SACA-1 可有效提高岩样遇水后的抗压强度，能够保证破碎性地层的稳定。

3.5. 和钻井液的配伍性评价

在室内分别配制聚磺改性钻井液体系，聚磺钻井液：清水 + 3%~5%膨润土 + 0.5% Na₂CO₃ + 2%~3% SPNH + 1.5%~3.0% SMP + 0.3%~0.5% CaO + 2%~3% KCl + 3%~5% FRH (润滑剂) + 特级重晶石 + 1% HAY + 1% CJD-1 + 3% NFA-25 + 4% YRZ-1；KCl-聚合物钻井液：清水 + 3%~5%膨润土 + 10% KCL + 0.8%~1% FA367 + 1%~2% JJFD-120 (聚合物降滤失剂) + 1%~2% NFA-25 (白沥青) + 2% FRH (润滑剂) + 0.2% Span-80 + 重晶石。测定加入不同浓度的 SACA-1 后的钻井液性能，热滚试验的条件为：温度 180℃，时间 16 h，现场岩样重量 30.00 g。结果见表 6~8 所示。从表中可以看出，热滚前后流变性能稳定，且随着 SACA-1 的浓度由 1%增加至 3%时，钻井液的热滚回收率均有一定程度的提高，其它性能稳定，表明 SACA-1 与这两种钻井液体系中的处理剂配伍性良好。

Table 6. Compatibility performance of 1% borehole stabilizer SACA-1 with drilling fluid
表 6. 1%井壁稳定剂 SACA-1 与钻井液配伍性能

钻井液体系	实验条件	AV/ mPa·s	PV/ mPa·s	YP/ Pa	GeL/ Pa/Pa	FLAPI/ ml	FLHTHP/ ml	ph	热滚回 收率/%
聚磺钻井液	热滚前	22	17	5	1/2	3.7	12.5	10	61.2
	热滚后	28	20	8	1/2	4.8	13.6	10	
聚磺钻井液 + 1%井壁稳定剂 SACA-1	热滚前	23.0	17.0	6.0	1/2	3.7	12.4	10	72.6
	热滚后	31.0	22.5	8.5	2/3	4.7	15.9	9.5	
KCl-聚合物钻井 液 + 1%稳定剂 SACA-1	热滚前	24.5	19.0	5.5	1/2	4.8	13.5	10	74.4
	热滚后	31.5	22.5	9.5	2/4	7.1	17.8	9	

Table 7. Compatibility performance of 2% borehole stabilizer SACA-1 with drilling fluid
表 7. 2%井壁稳定剂 SACA-1 与钻井液配伍性能

钻井液体系	实验条件	AV/ mPa·s	PV/ mPa·s	YP/ Pa	GeL/ Pa/Pa	FLAPI/ ml	FLHTHP/ ml	ph	热滚回 收率/%
聚磺钻井液 + 2%井壁稳定剂 SACA-1	热滚前	23.5	18.0	5.5	1/2	3.4	10.8	10	79.9
	热滚后	31.5	22.5	9.0	2/3.5	3.9	14.6	9.5	

续表

KCl-聚合物钻井液 + 2%稳定剂 SACA-1	热滚前	26.0	19.5	6.5	1/2	4.3	12.6	10	80.4
	热滚后	33.0	22.5	10.5	2/4.0	6.1	16.4	9	

Table 8. Compatibility performance of 3% borehole stabilizer SACA-1 with drilling fluid
表 8. 3%井壁稳定剂 SACA-1 与钻井液配伍性能

钻井液体系	实验条件	AV/ mPa·s	PV/ mPa·s	YP/ Pa	GeL/ Pa/Pa	FLAPI/ ml	FLHTHP/ ml	ph	热滚回收率/%
聚磺钻井液 + 3%井壁稳定剂 SACA-1	热滚前	24.5	19	5.5	1/2	3.1	9.8	10	85.8
	热滚后	32.5	24	8.5	2/3.5	3.5	14.2	9.5	
KCl-聚合物钻井液 + 3%稳定剂 SACA-1	热滚前	26.5	20	6.5	1/2	3.9	11.7	10	88.7
	热滚后	34.0	23.5	10.5	2/4.5	5.8	15.3	9	

为了研究井壁稳定剂 SACA-1 的稳定井壁的作用机理,用场发射扫描电镜对井壁稳定剂 3% SACA-1 加入到聚磺水基钻井液体系前后的泥饼进行了对比分析,结果见图 5。

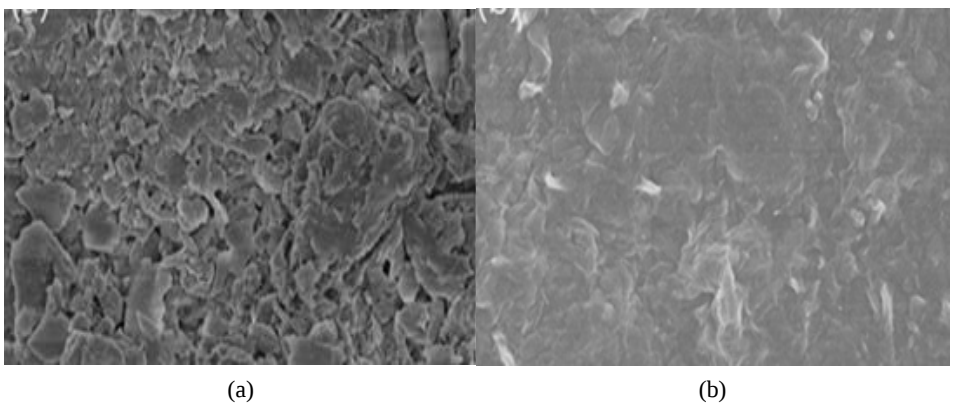


Figure 5. SEM images of polysulfur drilling fluid mud cake before (a) and after (b) action of borehole stabilizer SACA-1
图 5. 井壁稳定剂 SACA-1 作用前(a)、后(b)聚磺钻井液泥饼扫描电镜图

由图 5 可以看出,未添加 SACA-1 的聚磺钻井液体系形成的泥饼表面具有许多孔洞,这部分孔洞的存在将使得泥饼的渗透率变大,泥饼质量变差,大量钻井液滤液会进入地层,破坏地层的稳定性;而加有 SACA-1 的聚磺钻井液体系形成的泥饼表面光滑、致密,有利于阻止钻井液中的滤液进入地层,达到稳定井壁的目的。

4. 结论与认识

- (1) 井壁稳定剂 SACA-1 的最佳合成条件为单体(N-乙烯基吡咯烷酮、2-丙烯酰胺基 2-甲基丙磺酸 (AMPS)、二甲基二烯丙基氯化铵、r-丙烯酸脂丙基三甲氧基硅)质量比 4:2:1:1,单体浓度为 30%,反应时间为 4 h,反应温度为 60℃,引发剂(过硫酸钾/亚硫酸氢钠)加量为 0.5%,反应 pH 为 8~9。
- (2) 井壁稳定剂 SACA-1 的抗温可以达到 220℃,3% SACA-1 的溶液现场岩屑热滚回收率达到 80.03%;空气中联接抗剪切强度达到 0.301 MPa,在水中联接抗剪强度为 0.206 MPa;单轴抗压强度达到 8.98 MPa。

(3) 井壁稳定剂 SACA-1 对聚磺钻井液及 KCl-聚合物钻井液性能影响较小, 配伍性良好, 当加量为 3% 时, 聚磺钻井液和 KCl-聚合物钻井液的热滚回收率均超过 85%, 表明 SACA-1 具有广阔的应用前景。

基金项目

中国石油化工股份有限公司科技重大专项(P22097)。

参考文献

- [1] 李蕾, 郭保雨, 王旭东, 等. 一种化学胶结类防塌剂防塌效果的评价方法[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(5): 608-612.
- [2] 王松, 胡三清. 井壁稳定的理论与实践[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2002.
- [3] 王光兵. 硬脆性页岩水化特征及其对井壁坍塌压力的影响[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [4] 金衍, 薄克浩, 张亚洲, 等. 深层硬脆性泥页岩井壁稳定力学化学耦合研究进展与思考[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 159-167.
- [5] 刘海龙, 谢涛, 张磊, 等. 层理地层基质与弱面坍塌失稳规律分析[J]. 西南石油大学学报, 自然科学版, 2021, 43(2): 128-137.
- [6] 杨虎. 硬脆性地层井眼失稳剪切破坏程度定量预测[J]. 钻采工艺, 2018, 41(3): 21-24.
- [7] 马天寿, 陈平, 王旭东, 等. 页岩气储层井周孔隙压力传递数值分析方法[J]. 石油学报, 2016, 37(5): 660-671.
- [8] Yu, M., Chen, G., Chenevert, M.E. and Sharma, M.M. (2001) Chemical and Thermal Effects on Wellbore Stability of Shale Formations. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans, 30 September-3 October 2001, SPE-71366-MS. <https://doi.org/10.2118/71366-ms>
- [9] Hale, A.H., Mody, F.K. and Salisbury, D.P. (1993) The Influence of Chemical Potential on Wellbore Stability. *SPE Drilling & Completion*, 8, 207-216. <https://doi.org/10.2118/23885-pa>
- [10] Ghassemi, A. and Diek, A. (2002) Porothermoelasticity for Swelling Shales. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 34, 123-135. [https://doi.org/10.1016/s0920-4105\(02\)00159-6](https://doi.org/10.1016/s0920-4105(02)00159-6)
- [11] 王伟吉, 李大奇, 金军斌, 等. 顺北油气田破碎性地层井壁稳定技术难题与对策[J]. 科学技术与工程, 2022, 20(13): 5205-5213.
- [12] 陈修平, 李双贵, 于洋, 等. 顺北油气田碳酸盐岩破碎性地层防塌钻井液技术[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(1): 1-5.
- [13] 苏晓明, 练章华, 方俊伟, 等. 适用于塔中区块碳酸盐岩缝洞型异常高温高压储集层的钻井液承压堵漏材料[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 168-175.
- [14] 张艳娜, 孙金声, 耿东士. 杂化硅防塌剂的合成与性能评价[J]. 油田化学, 2016, 33(3): 396-400.
- [15] 齐宁, 吴凯凯, 马磊, 等. 纳米 SiO₂ 改善纤维复合防砂体的制备及性能研究[J]. 油田化学, 2016, 33(1): 66-68.
- [16] Zhang, J., Biao, F.J., Zhang, S.C. and Wang, X.X. (2011) A Numerical Study on Horizontal Hydraulic Fracture. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2, 7-13. <https://doi.org/10.1007/s13202-011-0016-4>
- [17] Abell, B.C., Choi, M.-K. and Shear, L.J. (2012) Specific Stiffness of Fractures and Fracture Intersections. In: *The 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, American Rock Mechanics Association, 57-63.
- [18] Brooker, D.C. and Ronalds, B.F. (2001) Prediction of Ductile Failure in Tubular Steel Members Using ABAQUS. *The 11th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Stavanger, June 2001, ISOPE-I-01-347.
- [19] 于雷, 张敬辉, 刘宝锋, 等. 微裂缝发育泥页岩地层井壁稳定技术研究与应用[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(3): 27-31.
- [20] 景岷嘉, 曾婷, 王江南. 聚合物纳米微球的制备及性能表征[J]. 精细石油化工进展, 2020, 21(4): 18-22.
- [21] 董殿权, 房超. PMMA 纳米微球的制备与表征[J]. 化工新型材料, 2017, 45(9): 68-70.
- [22] 张世锋, 秦栋辉, 袁卓, 等. 抗温改性氧化石墨烯基封堵防塌剂的研制及现场应用[J]. 油田化学, 2022, 39(4): 577-582.