

新型页岩抑制剂的合成及性能研究

杨佳丽¹,程云^{2*},马诚¹,吴限¹

(1. 辽宁石油化工大学石油化工学院, 辽宁抚顺 113001;

2. 辽宁石油化工大学环境与安全工程学院, 辽宁抚顺 113001)

摘要:以四乙烯五胺和 β -环糊精(β -CD)为主要单体,环氧氯丙烷做交联剂,采用溶液聚合法合成了一种新型页岩抑制剂(TD)。产物经红外光谱和热重表征,证明为目标产物。抑制性能评价结果表明:膨润土块在TD抑制剂溶液中可维持其完整性,表面无孔洞且微裂缝减少;当TD质量分数为3%时,膨润土的线性膨胀高度为4.65 mm,同时页岩滚动回收率为76.75%,相比去离子水中增加了52.95%,证明其抑制性能良好。采用电动电位(Zeta电位)、X射线衍射(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)揭示了抑制剂TD的微观作用机理,结果表明:TD可与粘土发生插层吸附并改变粘土的微观形貌。TD通过中和粘土颗粒表面的负电荷压缩双电层,在粘土颗粒表面形成强吸附,拉紧晶层,抑制水分子向粘土层间侵入,从而抑制粘土的水化膨胀。

关键词:水基钻井液;页岩抑制剂;水化膨胀;井壁稳定;性能评价

中图分类号:TE416

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)06-0183-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.06.029

Synthesis and performance study of a new shale inhibitor

YANG Jia-li¹, CHENG Yun^{2*}, MA Cheng¹, WU Xian¹

(1. School of Petrochemical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001, China;

2. School of Environmental and Safety Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001, China)

Abstract: A new shale inhibitor, TD, was synthesized by solution polymerization using tetraethylene pentamine and β -cyclodextrin (β -CD) as the main monomers, epichlorohydrin as the crosslinking agent. The product was characterized by infrared spectroscopy and thermogravimetric analysis, and proved to be the target product. The evaluation results of inhibition performance show that bentonite blocks can maintain their integrity in TD inhibitor solution, with no pores on the surface and reduced microcracks; When the TD mass fraction is 3%, the linear expansion height of bentonite is 4.65 mm, and the shale rolling recovery rate is 76.75%, which is an increase of 52.95% compared to deionized water, proving its good inhibitory performance. The micro mechanism of the inhibitor TD was revealed using Zeta potential, XRD, and SEM. The results showed that TD can undergo intercalation adsorption with clay and change the micro morphology of clay. TD compresses the double layer by neutralizing the negative charge on the surface of clay particles, forming strong adsorption on the surface of clay particles, tightening the crystal layer, and inhibiting the invasion of water molecules into the interlayer of clay, thereby suppressing the hydration expansion of clay.

Key words: water-based drilling fluid; shale inhibitor; hydration expansion; borehole stability; performance evaluation

随着常规油气的不断开发,页岩油气已逐渐成为油气勘探开发的主要来源^[1-2]。然而,开发页岩油气藏最严重的问题是井壁不稳定,因为页岩地层含有大量易水化的粘土矿物^[3-4]。在钻井过程中泥页岩水化膨胀和分散会导致卡钻、井眼坍塌和岩床形成等问题^[5-6]。在钻井液中加入页岩抑制剂是解决这一问题的有效途径^[7-8]。因此,合成新型页岩抑制剂,解决页岩水化膨胀分散问题,使页岩油气井井壁稳定,具有重要意义。 β -环糊精(β -CD)是一种由纤维素衍生的天然分子,具有独特的疏水空腔

和亲水外缘结构,是一种环境友好型材料,广泛应用于医药、食品、环境、化妆品、化学分析、分离技术、催化剂等领域^[9-13]。目前,环糊精基材料已被应用于油田,并在增强石油化学品的性能和提高石油勘探效率方面表现良好^[14-16]。 β -CD分子的疏水空腔结构可形成天然防水层,该层可防止水分子进入粘土的晶体层,从而抑制粘土矿物的水化和膨胀; β -CD中有大量的羟基,可牢固地吸附在粘土表面,防止粘土膨胀和迁移。

为此,以四乙烯五胺、 β -CD和环氧氯丙烷为原

收稿日期:2025-08-12;修回日期:2026-03-30

基金项目:中国石油化工集团公司科技部项目(421034);辽宁省兴辽英才计划项目(XLYC1902053)

作者简介:杨佳丽(1997-),女,硕士生,研究方向为复合材料及钻井液处理剂,smeyjl@163.com;程云(1971-),男,硕士,实验师,研究方向为油田化学品,通讯联系人,chy-ah@163.com。

料合成了一种新型页岩抑制剂:TD。通过膨润土块浸泡实验,线性膨胀实验和页岩滚动回收实验对其抑制性能进行了评价,结果表明所合成的 TD 具有良好的抑制性能。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

四乙烯五胺、 β -环糊精(β -CD)、环氧氯丙烷、NaOH、无水碳酸钠,均为分析纯;膨润土,上海卓亚矿山机械有限公司。GJS-B12K 型变频高速搅拌机、GRL-BX3 型便携式滚子加热炉、NP-02A 型常温智能页岩膨胀仪,青岛百瑞达石油机械制造有限公司;AO-HD206 型视频显微镜,深圳市奥斯微光学仪器有限公司;WQF-520 型傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR),北京瑞利分析仪器公司;Q600 型热重-差热分析仪(TG),美国 TA 公司;D/max-RB 型 X 射线衍射仪(XRD),日本理学电机公司;NanoZS90 型纳米激光粒度仪(Zeta 电位),马尔文公司;SU8010 型场发射扫描电子显微镜(SEM),日本日立公司。

1.2 页岩抑制剂的合成

将适量的四乙烯五胺溶于去离子水中,将提前用碱性溶液溶解的 β -CD 溶液转移至上述溶液中,将上述溶液转移至反应釜中并充分搅拌 20 min,之后缓慢加入交联剂环氧氯丙烷,在 40℃ 下反应 5 h 后得到浅黄色粘稠状液体抑制剂 TD。TD 的反应式及合成产物如图 1 所示。

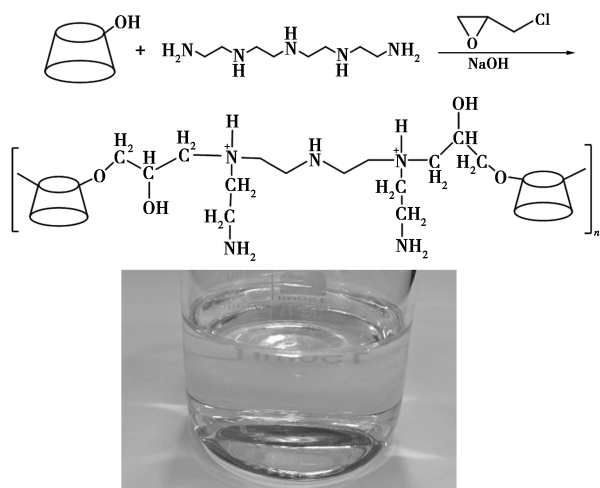


图 1 合成的浅黄色粘稠液体抑制剂 TD

1.3 页岩抑制剂的表征

将合成的产物提纯干燥后,采用 KBr 压片法,进行红外光谱仪测定;利用热重测试仪对其热稳定性进行测试,实验在空气氛围下进行,升温速率为

10℃/min,温度范围为 0~800℃。

1.4 抑制性能评价

1.4.1 膨润土块浸泡实验

膨润土块浸泡实验是一种用于评价页岩抑制剂抑制性能简单直观的方法。将 10.0 g 膨润土倒入模具中,在 10 MPa 压力下压制 5 min,制得膨润土块,然后将土块浸入水和不同质量分数的 TD 溶液中,观察并记录浸泡 24 h 及干燥后土块的状态。

1.4.2 线性膨胀实验

采用线性膨胀实验研究膨润土在不同 TD 抑制剂溶液中的膨胀行为。同浸泡实验方法制得膨润土块,并测量土块的初始高度。将土块放入膨胀仪样品槽中,加入不同质量分数的 TD 溶液,测定膨胀高度随时间的变化情况,测试时长为 24 h。

1.4.3 页岩滚动回收实验

页岩滚动回收实验以评价抑制剂的防膨效果和耐久性。将岩屑过 6~10 目筛,并于 105℃ 下烘干待用。将 20.0 g 岩屑放入装有 350 mL 抑制剂溶液的老化罐中,把老化罐置于滚子加热炉中 150℃ 老化 16 h。冷却后将岩屑在 105℃ 下干燥 4 h,过 40 目筛后记录筛余质量,计算页岩滚动回收率,计算公式如式(1)所示。

$$\text{页岩滚动回收率} = [\text{筛余质量}(\text{g})/20.0] \times 100\% \quad (1)$$

1.5 抑制机理研究

1.5.1 Zeta 电位分析

Zeta 电位反映了粘土胶体颗粒带电情况。粘土颗粒 Zeta 电位越低,分散越严重,更易发生水化作用^[17]。通过 Zeta 电位测试仪分别测定 4% 预水化膨润土基浆和加入不同 TD 抑制剂浆液的 Zeta 电位。

1.5.2 XRD 分析

粘土矿物是层状硅酸盐矿物,由硅氧四面体和铝氧八面体组成。当粘土矿物与水接触时,水分子侵入到粘土矿物的结晶层中,导致粘土矿物的层间距(d_{001} 间距)改变。通过 XRD 表征 TD 对膨润土层间距(d_{001})的影响。在 100 mL 不同质量分数的抑制剂溶液中加入 4 g 膨润土,搅拌 24 h 后用离心机离心 5 min,取底部湿态沉淀,一部分湿态沉淀干燥后研磨成粉末,分别进行湿态、干态 XRD 分析测定层间距。

1.5.3 SEM 分析

采用 SU8010 场发射扫描电子显微镜,在高真空模式下,通过比较膨润土、纯水处理膨润土和 TD 处理膨润土的表面形貌,研究 TD 对粘土水化膨胀

和分散的抑制作用。

2 结果与讨论

2.1 抑制剂表征

2.1.1 FT-IR 分析

图2所示为TD的红外光谱图。 3430 cm^{-1} 是环糊精分子中羟基的O—H伸缩振动峰和伯胺中N—H伸缩振动峰产生宽的吸收带; 2951 、 2843 cm^{-1} 是C—H反对称和对称伸缩振动峰,由此可以证明产物中存在亚甲基; 1640 cm^{-1} 处峰位对应N—H弯曲振动和O—H弯曲振动吸收峰; 1465 cm^{-1} 是季铵盐阳离子部分中C—H弯曲振动峰; 1155 cm^{-1} 处为C—N—C键吸收峰; 1082 、 1030 cm^{-1} 分别为环糊精中C—O—C的伸缩振动峰和C—OH的C—O伸缩振动峰,说明该聚合物含有环糊精的结构; 940 cm^{-1} 处对应于季铵盐— $\text{CH}_2\text{—N}^+$ 的弯曲振动谱带,表明阳离子基团已经结合到聚合物主链上;由此可以看出合成出的产物既含有环糊精结构又有阳离子季铵基团,说明聚合出目标产物。

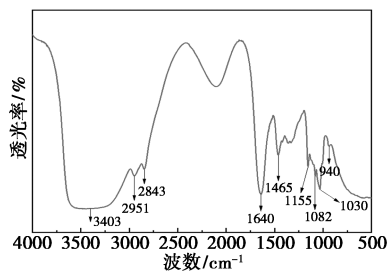


图2 TD抑制剂的FT-IR谱图

2.1.2 热重分析

图3所示为TD的热重曲线图。由图可知,TD分解为3个阶段,第1阶段在室温— 217°C 下损失7.34%的质量,该阶段失重较少,主要是因为产物中吸附水和层间结合水挥发所致;第2阶段在 $217\sim 462^\circ\text{C}$ 下损失40.72%的质量,这一阶段失重量明显,主要为聚合物分子链高温下断裂和 $\beta\text{-CD}$ 结构分解;第3阶段为 $462\sim 512^\circ\text{C}$ 下损失12.92%质量,主

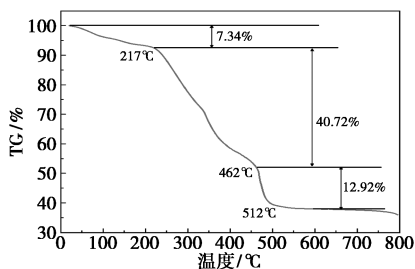


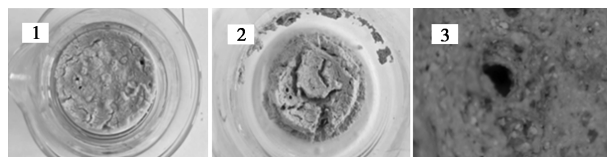
图3 TD抑制剂的热重曲线图

要为聚合物剩余结构炭化所致; 512°C 之后,产物质量基本不变。

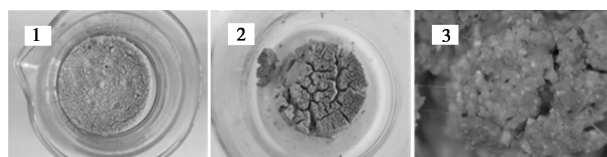
2.2 抑制性能评价

2.2.1 膨润土块浸泡实验

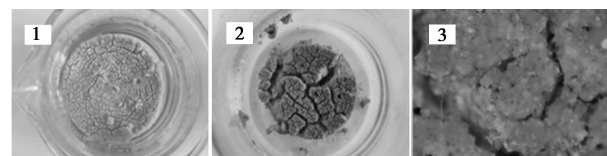
将膨润土块分别浸泡在水和TD溶液中,记录浸泡后、干燥后表面形貌,用显微镜对样品的表面形貌进行表征。经水和不同质量分数的TD浸泡后的土块形貌如图4所示。从图中看出水中浸泡干燥后的土块表面有明显的孔洞和裂痕,且土块边缘坍塌。当土块浸泡在TD溶液中,仍可维持原样貌,其表面



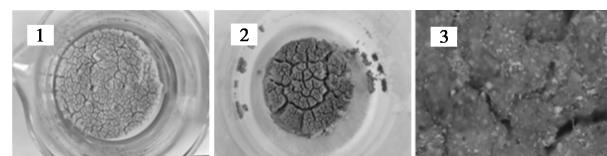
(a)去离子水



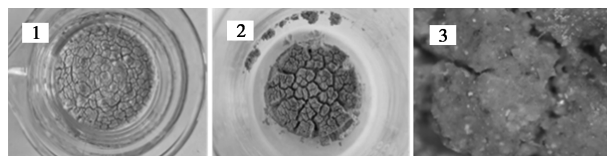
(b)0.5% TD



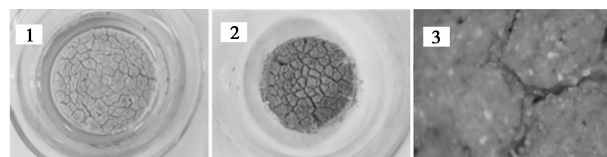
(c)1.0% TD



(d)1.5% TD



(e)2.0% TD



(f)3.0% TD

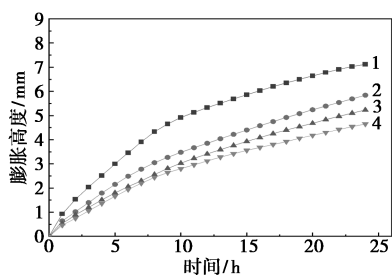
1—浸泡后;2—干燥后;3—显微镜图

图4 去离子水和TD溶液中的膨润土块浸泡实验

颜色变深,形成一层保护膜,阻止水分浸入土块;随着 TD 质量分数增加,其表面裂痕变窄变浅,同时无明显孔洞,且显微镜下观察,加入 TD 后表面裂缝处有丝状白线,随其质量分数增加,TD 浸入粘土层间使裂缝变窄。

2.2.2 线性膨胀实验

图 5 为膨润土在去离子水和不同质量分数 TD 溶液中的线性膨胀高度曲线。膨润土在去离子水中 24 h 的膨胀高度最大,为 7.12 mm,说明其在水中有较大的水化膨胀,是因为干燥的粘土更容易被水分子润湿,对水分子吸力大,迅速发生表面水化,导致粘土表面水化膜增厚;随着表面水化发生,水分子逐渐进入粘土内部,发生渗透水化,粘土膨胀量逐渐增加。当加入质量分数为 1%、2%、3% 的 TD 后,膨胀高度均减小,随着 TD 质量分数增加,膨胀高度逐渐降低,分别为 5.84、5.23、4.65 mm,分别降低了 17.98%、26.54%、34.69%。说明 TD 一定程度上抑制了膨润土的水化,有抑制粘土水化作用。TD 分子中含有季铵基团和大量羟基,可牢固地吸附于粘土表面并排斥掉粘土层间水,达到良好的页岩抑制效果。



1—去离子水;2—1% TD;3—2% TD;4—3% TD

图 5 不同质量分数 TD 溶液中膨润土的线性膨胀曲线

2.2.3 页岩滚动回收实验

岩屑在钻井液循环过程中会受到钻头和钻井液流体的切削,使岩屑分散成微细颗粒,这些微细颗粒对钻井液的流变性影响很大,使钻井液黏度增加,影响钻井效率。向钻井液中加入页岩抑制剂可以抑制岩屑水化分散,保证钻井液流变性满足钻井工程的要求。为了评价抑制剂抑制页岩水化分散的性能,进行了页岩滚动回收实验,图 6 为页岩在水和质量分数为 1%、2% 和 3% 的 TD 溶液中 150℃ 老化 16 h 的回收率。由图可知,在去离子水中页岩的回收率仅为 23.80%,水会渗入岩屑内部,裂解使其分解成更小的岩屑;与清水相比,在 TD 抑制剂中岩屑回收率明显提高,当溶液中 TD 质量分数为 1% 时,页岩

滚动回收率为 66.00%,比去离子水中页岩回收率提高了 42.20%,随 TD 质量分数增加页岩回收率逐渐提高,当溶液中 TD 质量分数增加为 3% 时,页岩滚动回收率达到 76.75%,相比去离子水中增加了 52.95%,表明抑制剂 TD 在 150℃ 下可有效的抑制岩屑水化分散,其抑制性能优异。

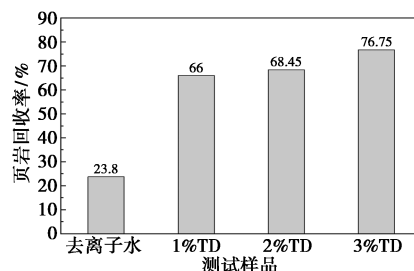


图 6 不同质量分数 TD 抑制剂的页岩滚动回收率

2.3 抑制机理研究

2.3.1 Zeta 电位分析

Zeta 电位表征了粘土表面电荷的变化,揭示了抑制剂在粘土表面的吸附作用。膨润土基浆和不同质量分数 TD 浆液的 Zeta 电位于图 7 中。由于八面体层中的同晶取代,膨润土基浆的平均 Zeta 电位值为 -38.3 mV,高负电荷使粘土在水中有良好的分散性,易发生水化作用。TD 抑制剂加入使 Zeta 电位发生变化,在吸附过程中,粘土和抑制剂中的季铵基团之间发生静电作用,吸附在其表面负电荷上,与粘土颗粒形成氢键,导致 Zeta 电位绝对值降低。据文献[18]可知,当层电荷减少 20% 时,粘土膨胀和水化可被完全抑制,在加入质量分数为 3% 的 TD 后,其 Zeta 电位增大为 -27.6 mV,增加了 27.9%,表明 TD 抑制剂的加入可减弱扩散双电层的排斥作用,从而抑制粘土表面的水化膨胀与分散。此外,抑制剂分子中大量的羟基对粘土水化有良好的抑制作用。同时,TD 抑制剂对基浆体系的 Zeta 电位绝对值改变幅度相对较小,对体系的稳定性影响不大。该抑制剂相对温和,作为抑制剂加入水基钻井液体系时,

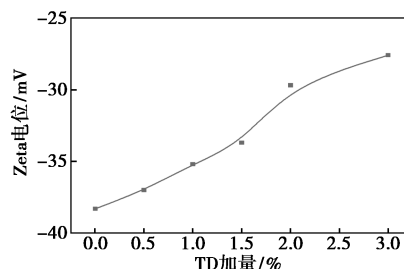
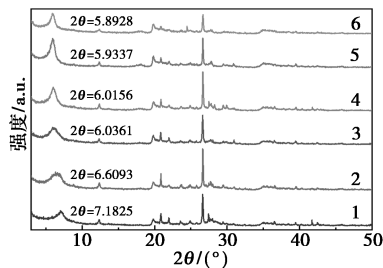


图 7 不同质量分数 TD 浆液的 Zeta 电位

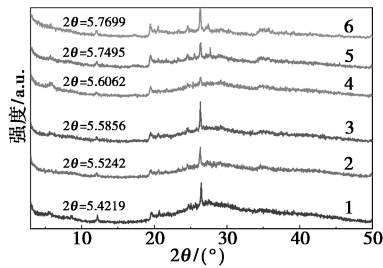
不会造成体系的电位反转,导致处理剂配伍性较差等问题。

2.3.2 XRD 分析

当粘土与水接触时,会发生表面水化和渗透水化,因此会扩大粘土层间距离。图 8 和表 1 为经不同浓度 TD 处理后膨润土的 XRD 谱图和湿、干态层间距。由图 8 和表 1 可知,原始干态膨润土的层间距离为 1.229 7 nm,当用不同质量分数的 TD 处理并干燥后,膨润土层间距离增加为 1.336 3、1.463 0、1.468 0、1.488 2、1.498 6 nm,表明 TD 抑制剂进入粘土层间,发生插层行为。



(a) 干态样品



(b) 湿态样品

1—膨润土;2—0.5% TD;3—1.0% TD;4—1.5% TD;
5—2.0% TD;6—3.0% TD

图 8 不同质量分数 TD 处理后膨润土的 XRD 谱图

表 1 不同质量分数 TD 处理后的膨润土的干/湿态晶层间距

样品	晶层间距/nm	
	干态	湿态
去离子水	1.2297	1.6286
0.5% TD	1.3363	1.5985
1.0% TD	1.4630	1.5809
1.5% TD	1.4680	1.5751
2.0% TD	1.4882	1.5359
3.0% TD	1.4986	1.5304

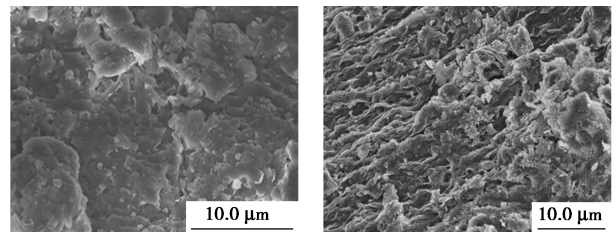
去离子水处理后,湿态膨润土层间间距增大为 1.628 6 nm,水化后层间距增大是因为:水分子会侵

入粘土矿物质层中,晶体层表面上的极性 Si—O 和 O—H 键可吸附具有同样极性的水分子,这样在粘土表面形成一层水化膜,该薄膜扩大了粘土晶层间距离,使粘土膨胀和分散;当阳离子交换发生在低盐度水溶液中时,粘土将在粘土晶体层的表面之间形成扩散双电层,由于扩散双电层相互排斥,粘土也会膨胀并分散。

与去离子水处理的膨润土相比,用 TD 抑制剂处理的膨润土的 2θ 逐渐变大,所对应的层间距逐渐减小。经计算得知,TD 质量分数为 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%和 3.0%时所对应膨润土层间距分别为 1.598 5、1.580 9、1.575 1、1.535 9、1.530 4 nm,表明 TD 可阻止水分子进入粘土层间,拉紧晶层,减小层间距,进而抑制膨润土水化分散。TD 分子中季铵基团可与粘土晶面发生静电中和作用,从而减小晶面间距,同时使晶面间水分子排出。此外,分子中存在大量羟基,与粘土表面形成氢键作用,二者共同作用比粘土表面上的水分子与氧原子之间的氢键作用强^[19],使一些层间水分子被驱逐出去,导致层间距减小。通过静电作用和氢键作用,TD 将粘土片层束缚在一起,减弱粘土水化。

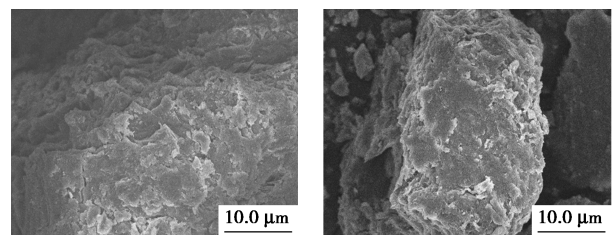
2.3.3 SEM 分析

通过 SEM 比较和观察 TD 粘土抑制剂处理前后膨润土的微观结构变化,图 9 为未处理、纯水处理和不同质量分数 TD 抑制剂处理的膨润土的 SEM 图像。从图 9(a)可以看出,未水化膨润土为片层结构,紧密无序堆积在一起,表面光滑平整,存在大小不一的孔洞和裂缝;从图 9(b)可看出,原始膨润土充分水化并膨胀,微观结构被破坏,表面膨胀凸起、



(a) 未水化膨润土

(b) 去离子水处理膨润土



(c) 1% TD 处理膨润土

(d) 3% TD 处理膨润土

图 9 TD 抑制剂处理前后膨润土的微观形态

粗糙不平,层状结构疏松,可见大量微孔隙;从图 9(c)、(d)可看出,用 TD 抑制剂处理的膨润土表面趋于平整光滑,微孔隙和微裂缝减少,片层结构更紧密,粘土颗粒增大,形成一个大的块状聚集体。实验表明,TD 可吸附于粘土表面,封堵其表面孔隙,阻止水分子与其接触,从而抑制粘土发生水化膨胀作用。

3 结论

(1)以四乙烯五胺、 β -CD 和环氧氯丙烷为原料合成了一种新型页岩水化抑制剂 TD,通过 FT-IR 和热重对其进行表征,证明成功合成具有环糊精结构和阳离子季铵基团的目标产物,且 TD 在 200℃ 以下具有良好的抗温性能。

(2)通过膨润土块浸泡实验、线性膨胀实验、页岩滚动回收实验评价其抑制性能,土块浸泡在 TD 抑制剂溶液中时可维持原样貌,表面颜色加深,形成一层保护膜,阻止水分子进入;当 TD 质量分数为 3% 时,膨润土的线性膨胀高度从在水中的 7.12 mm 降低为 4.65 mm,有抑制粘土水化的作用;在 150℃,TD 抑制剂质量分数为 3% 的条件下,页岩滚动回收率为 76.75%,相比去离子水中增加了 52.95%,表明抑制剂 TD 在 150℃ 下可有效的抑制岩屑水化分散,其抑制性能优异。

(3)通过 Zeta 电位、XRD、SEM 分析研究其抑制机理,TD 抑制剂通过插层行为进入粘土矿物层中,TD 分子通过静电作用和氢键作用吸附在粘土晶面层表面,降低粘土表面和粘土层间的静电斥力,压缩了粘土扩散双电层和粘土晶体层的空间,使片层结构更紧密,从而抑制粘土的水化膨胀与分散。

参考文献

- [1] 刘锋报,孙金声,王建华.国内外深井超深井钻井液技术现状及发展趋势[J].新疆石油天然气,2023,19(2):34-39.
- [2] 贾承造,王祖纲,姜林,等.中国页岩油勘探开发研究进展与科学技术问题[J].世界石油工业,2024,31(4):1-11.
- [3] 邱正松,张道明,付建国,等.塔河油田长裸眼井段聚胺钻井液研究及应用[J].辽宁石油化工大学学报,2016,36(6):33-38.
- [4] Ai E, Li Q, Liu Z, et al. Advanced trends in shale mechanical inhibitors for enhanced wellbore stability in water-based drilling fluids

- [J]. Minerals, 2024, 14(12): 1197.
- [5] 胡祖彪,王清臣,张勤,等.长庆油田页岩油井 5 000 m 水平段高性能水基钻井液钻井实践[J].钻井液与完井液,2023,40(3):325-331.
- [6] 蒋巍.海上硅酸钠聚合醇钻井液的研制[J].石油化工高等学校学报,2019,32(4):52-57.
- [7] 都伟超,孙金声,蒲晓林,等.国内外黏土水化抑制剂研究现状与发展趋势[J].化工进展,2018,37(10):4013-4021.
- [8] 李佳,蒲晓林,戎克生,等.一种小阳离子有机胺页岩抑制剂的合成及性能研究[J].现代化工,2017,37(1):128-131.
- [9] 熊小燕,林绮欣,吴斌华,等.环糊精及其衍生物作为纳米药物载体的研究进展[J].河北师范大学学报(自然科学版),2025,49(3):276-286.
- [10] 金秋,王霄鹏,王丽霞,等.含环糊精吸附剂的合成与应用[J].离子交换与吸附,2024,40(4):284-295.
- [11] Seidi F, Jin Y, Xiao H. Polycyclodextrins: Synthesis, functionalization, and applications [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 242: 116277.
- [12] Liu Y, Chen Y, Gao X, et al. Application of cyclodextrin in food industry [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 62(10): 2627-2640.
- [13] Sara P, Majid A, Ahmad P M. A review of using β -cyclodextrin-based catalysts for sonogashira reactions [J]. Journal of Organometallic Chemistry, 2025, 1031: 123592.
- [14] Tang W, Zou C, Da C, et al. A review on the recent development of cyclodextrin-based materials used in oilfield applications [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 240(6): 116321.
- [15] Pu W, Shen C, Wei B, et al. A comprehensive review of poly-saccharide biopolymers for enhanced oil recovery (EOR) from flask to field [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2018, 61(5): 1-11.
- [16] 孙建萧,荆江录,王渊,等.基于 β -环糊精的高矿化度水中曲拉通 X-405 的检测新方法[J].日用化学工业(中英文),2024,54(4):369-375.
- [17] Muhammed N S, Olayiwola T, Elkhatatny S. A review on clay chemistry, characterization and shale inhibitors for water-based drilling fluids [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 206: 109043.
- [18] Zhong H, Qiu Z, Tang Z, et al. Study of 4, 4'-methylenebis-cyclohexanamine as a high temperature-resistant shale inhibitor [J]. Journal of Materials Science, 2016, 51: 7585-7597.
- [19] Xu J, Qiu Z, Zhao X, et al. Study of 1-octyl-3-methylimidazolium bromide for inhibiting shale hydration and dispersion [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 177: 208-214. ■

欢迎订阅《现代化工》杂志,邮发代号 82—67。