

CO₃²⁻/HCO₃⁻对粘土吸附性能影响研究

邢亚萌, 张连喜*, 张广宇, 杨毅, 黎涛

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年6月27日; 录用日期: 2024年8月15日; 发布日期: 2024年10月25日

摘要

钻井液发挥作用主要通过处理剂在粘土上的吸附作用, 但在钻井过程中常常会遇到 CO₃²⁻/HCO₃⁻ 污染的问题, 导致处理剂失效, 使钻井液体系流变性和滤失性出现严重恶化。本文通过室内实验模拟 CO₂ 侵入粘土基浆的性能, 分析 CO₃²⁻/HCO₃⁻ 污染对粘土基浆的流变、滤失性能影响规律, 从处理剂角度分析 CO₃²⁻/HCO₃⁻ 污染机理。研究表明: CO₃²⁻/HCO₃⁻ 污染存在临界值, 当 CO₃²⁻/HCO₃⁻ 浓度达到 1564 mg/L 时粘土基浆粘度和滤失量出现大幅上升的趋势, 且随着污染程度的加重, 粘土颗粒逐渐聚集, 形成大颗粒、漏失通道增大; 对 RSTF 吸附实验结果表明, 污染前 RSTF 在粘土上吸附平衡量为 103.21 mg/L, 污染后吸附平衡量大幅减小, 吸附等温线 Langmuir 方程比 Freundlich 方程能更好地描述 RSTF 在粘土颗粒上的吸附过程。

关键词

粘土, CO₃²⁻/HCO₃⁻, 性能评价, 吸附模型

Study on the Influence of CO₃²⁻/HCO₃⁻ on the Adsorption Performance of Clay

Yameng Xing, Lianxi Zhang*, Guangyu Zhang, Yi Yang, Tao Li

School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Jun. 27th, 2024; accepted: Aug. 15th, 2024; published: Oct. 25th, 2024

Abstract

Drilling fluids function mainly through the adsorption of the treatment agent on the clay, but CO₃²⁻/HCO₃⁻ contamination is often encountered during the drilling process, leading to treatment

*通讯作者。

文章引用: 邢亚萌, 张连喜, 张广宇, 杨毅, 黎涛. CO₃²⁻/HCO₃⁻ 对粘土吸附性能影响研究[J]. 矿山工程, 2024, 12(4): 861-870. DOI: 10.12677/me.2024.124101

agent failure and severe deterioration of the rheology and filtration loss of the drilling fluid system. In this paper, we simulate the performance of CO₂ intrusion into clay-based slurry through indoor experiments, analyze the influence law of CO₃²⁻/HCO₃⁻ contamination on the rheological and filtration loss performance of clay-based slurry, and analyze the CO₃²⁻/HCO₃⁻ contamination mechanism from the viewpoint of treating agent. The results of the study show that there is a critical value for CO₃²⁻/HCO₃⁻ pollution, and when the concentration of CO₃²⁻/HCO₃⁻ reaches 1564 mg/L there is a trend of a large increase in the viscosity and filtration loss of the clay-based slurry and with the increase in the degree of contamination, the clay particles are gradually aggregated, large particles are formed, and the leakage channel is increased; the results of adsorption experiments on RSTF showed that the equilibrium amount of RSTF adsorbed on clay was 103.21 mg/L before contamination, and the equilibrium amount of adsorption was greatly reduced after contamination, and the adsorption isotherm Langmuir equation can better describe the adsorption process of RSTF on clay particles than Freundlich equation.

Keywords

Clay, CO₃²⁻/HCO₃⁻, Performance Evaluation, Adsorption Modeling

Copyright © 2024 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. 前言

随着钻井新工艺和新技术的进步, 我们不再局限于勘探和开发浅部、易钻探区域和储层。如今, 我们正投入更多的资金和力量来开发具有挑战性的深部储层。在现场深部钻井作业中, 钻遇不同的地层时会有不同的污染物侵入钻井液, 影响钻井液的性能。在西南油气田、塔里木油田、大庆油田等我国主力油田的勘探开发过程中, 钻遇 CO₂ 气的地层频率不断增大, 钻井液受 CO₂ 大量侵入, 造成钻井液粘度升高、滤失量增大等一系列问题, 严重破坏钻井液性能, 影响钻井作业的正常进行[1]-[3]。

水、粘土、处理剂是水基钻井液三个最重要的组成要素, 它们为钻井液发挥作用提供了重要基础条件。水和粘土为钻井液处理剂提供了适宜的介质条件, 使其能够充分发挥作用。首先, 钻井液处理剂与水之间发生相互作用, 通过吸水作用, 使得处理剂能够与水充分接触, 然后处理剂在水中溶解或溶胀, 使得处理剂在钻井液体系中发挥不同的作用。随后, 处理剂与粘土颗粒相互作用, 发生吸附现象, 从而与粘土颗粒紧密结合。最终, 在钻井液中, 处理剂能够发挥各种不同的作用效果, 以满足水基钻井液体系的各项性能要求。

处理剂会在粘土表面聚集, 通过对粘土表面上处理剂的吸附行为进行研究, 可以发现处理剂与粘土颗粒之间存在一种相互作用力, 这种相互作用力使得处理剂能够发挥一定的作用效果。相反地, 脱附指的是处理剂从粘土表面脱离并进入液相的过程。一般来说, 处理剂的吸附和脱附是可逆的过程[4]。因此, 在 CO₃²⁻/HCO₃⁻ 污染条件下分析处理剂在粘土表面的吸附规律和吸附状态, 有助于进一步分析 CO₂ 污染钻井液的本质规律。

在深井钻井中, 钻井液需要具备抗高温和抗 CO₂ 污染的特性。其中, RSTF 是一种由腐植酸丙磺酸酰胺多元共聚物构成的化学处理剂。它是通过将两种以上的聚合物单体与腐植酸进行接枝共聚制备而成的。RSTF 能够显著降低水基钻井液在各种条件下的高温高压滤失量, 有着较强的抗盐性能。它的抗温性能可

达到 220°C [5], 在冯丽等人的研究中表明, 加入 RSTF 后使得钻井液的耐高温抗盐性能显著提高, 并有效改善污染后钻井液的流变性能, 因此, 本文处理剂以 RSTF 为研究对象, 分析 RSTF 在粘土表面的吸附规律。

静态吸附量测定是评价处理剂在钻井液中发挥作用的重要步骤。由于吸附量要受到处理剂浓度、吸附时间、PH 值、分子结构、温度压力等许多因素的影响, 根据分析的问题固定其中部分因素, 讨论其他因素对吸附量的影响[6]。因此讨论在有 CO₃²⁻/HCO₃⁻ 污染实验条件下, 粘土对处理剂 RSTF 平衡吸附量及吸附等温线的影响规律。

目前研究表明, 针对 CO₃²⁻/HCO₃⁻ 污染水基钻井液的机理不够明确, 研究不够深入和全面, 还缺乏一个统一的认识。为此, 本文针对不同污染程度下粘土基浆, 研究处理剂 RSTF 在粘土表面的吸附影响规律, 通过吸附等温线模型, 验证 CO₃²⁻/HCO₃⁻ 污染对粘土的吸附性能的影响机理。

2. 实验部分

2.1. 材料与仪器

钠膨润土, 工业级, 山东潍坊远程膨润土有限公司; 钻井液用高温抗盐降滤失剂(RSTF), 化学纯; 稀硫酸, 分析纯; 甲基橙, 分析纯; 酚酞, 分析纯。

DT-10 多头磁力搅拌器, 常州易晨仪器制造有限公司; UV-2601 型紫外分光光度计, 上海奥析科学仪器有限公司; XGRL-5 高温滚子加热炉, 青岛海通达专用仪器有限公司; ZNN-D6 六速旋转粘度计, 青岛海通达专用仪器有限公司; SD-6 六联中压滤失仪, 青岛海通达专用仪器有限公司; JSM-7800F 场发射扫描电镜(SEM), 日本电子; PHS-3E 智能酸度计, 江苏江分电分析仪器有限公司。

2.2. 实验方法

2.2.1. CO₃²⁻/HCO₃⁻ 浓度测试

使用 Pf 酚酞碱度、Mf 甲基橙碱度测定浆体内 CO₃²⁻/HCO₃⁻ 含量[7], 取不同污染程度的粘土基浆, 使用中压滤失仪处理, 收集 1 mL 滤液, 加入 2 滴酚酞溶液, 第一次滴定 0.01 mol/L 的 H₂SO₄ 至 PH 为 8.3, 记录此时硫酸的体积为 V₁, 即为 Pf, 继续滴定 2~3 滴甲基橙溶液, 再滴定硫酸至 PH 为 4.3, 记录此时体积为 V₂, V₁ 与 V₂ 总和记录为 Mf, 对比 Pf 和 Mf 大小, 判断滤液中存在的离子种类, 根据表 1 计算离子含量。

Table 1. Ion concentration determination

表 1. 离子浓度判别

	OH ⁻ (mg/L)	CO ₃ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)
Pf = 0	0	0	1220 Mf
2pf < Mf	0	1200 Pf	1220 (Mf-2Pf)
2pf + Mf	0	1200 Pf	0
2pf > Mf	340 (2Pf-Mf)	1200 (Mf-Pf)	0
pf + Mf	340 Mf	0	0

2.2.2. CO₃²⁻/HCO₃⁻ 污染对粘土基浆物性影响规律

配制质量分数 5% 含量的钠膨润土基浆, 高速搅拌 20 min, 密封养护 24 h, 保证粘土充分水化。取四份 400 ml 粘土基浆, 分别加入不同浓度 Na₂CO₃, 模拟 CO₃²⁻/HCO₃⁻ 污染, 使用高温滚子炉在 120°C 下老

化 16 h, 在转速 2000 rpm 下高速搅拌 20 min, 记录不同 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 浓度下粘土基浆表观粘度、塑性粘度、API 滤失量等基础物性数据。

2.2.3. 处理剂 RSTF 在粘土中静态吸附实验

为了测试处理剂溶液浓度, 取 400 ml 配制好的粘土基浆, 将处理剂 RSTF 按照一定的浓度加入粘土基浆中, 放置于具塞三角瓶, 塞好瓶盖, 在恒温水浴振荡器吸附 RSTF, 水平往复振荡频率为 120 次/min, 吸附到一定的时间后取上层清液, 离心 20 min (转速 3000 r/min), 抽取上层清液用浊度法测试水相中处理剂 RSTF 的浓度, 配制 RSTF 质量浓度标准曲线[8], RSTF 标准曲线回归方程为 $y = -0.01235 + 0.01433x$ (图 1)。

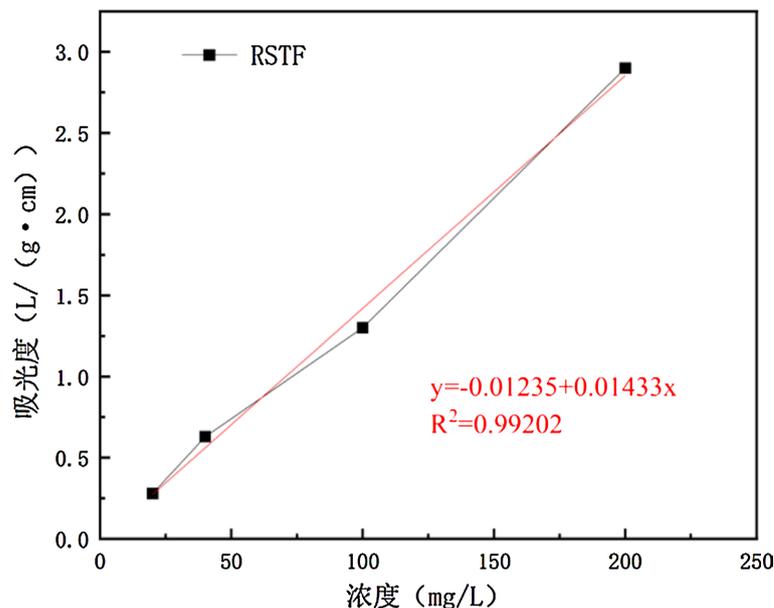


Figure 1. Relationship between RSTF mass concentration and absorbance

图 1. RSTF 质量浓度与吸光度关系

根据水溶液处理剂的浓度得到处理剂在粘土表面的吸附量, 用式(1)计算平衡吸附容量[9]。

$$q_e = \frac{(C_0 - C)V}{1000\omega} \quad (1)$$

式中: C_0 、 C 分别为 RSTF 初始浓度和吸附后溶液中剩余 RSTF 的浓度, mg/L; V 为加入溶液的体积, mL; ω 为加入粘土的质量, g; q_e 为平衡吸附容量, mg/g。

2.2.4. $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 含量对处理剂在粘土中吸附规律实验

研究处理剂与粘土在不同污染程度下的吸附量, 可建立 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 与吸附量的相互关系, 分析 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 含量对处理剂在粘土中吸附规律。具体实验步骤如下: 取 3 份 400 mL 粘土基浆, 分别加入质量分数为 0%、0.5%、2% 的 Na_2CO_3 , 搅拌 20 min, 静置 2 h 养护, 形成三种不同污染程度的粘土基浆, 再称量 8 g RSTF 加入三种污染基浆中, 充分吸附, 分别在不同污染程度下测定处理剂在粘土上的吸附量。

2.2.5. $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 对处理剂吸附等温线实验

取两份粘土基浆, 加入质量分数 0% 和 2% 的 Na_2CO_3 , 配制无污染和重度污染两种粘土基浆, 分别加入不同浓度的 RSTF 到 400 mL 粘土基浆溶液中, 振荡吸附 1 h 后, 取悬浮液在 3000 r/min 的条件下离心

20 min, 分别测定在无污染和重度污染两种条件下的不同 RSTF 浓度的残余量, 计算吸附量, 最后绘制吸附等温曲线。

2.2.6. 吸附数学模型

本文用 Langmuir 等温模型和 Freundlich 等温模型进行拟合, 得出吸附等温参数及回归方程[10]-[15]。Langmuir 等温模型是一个基于动力学原理的经验模型, 即在平衡条件下, 吸附和解吸的表面速率与零积累相等。根据以下假设, (a) 单层吸附、(b) 均质位点、(c) 恒定吸附能、(d) 被吸附分子之间无横向相互作用。Langmuir 等温模型表达式为:

$$q_e = \frac{q_0 K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2)$$

式中 q_e 为吸附平衡量, 单位为 mg/g, C_e 为液相平衡浓度, 单位为 mg/L, q_0 为单位质量表面活性剂的最大吸附量, 单位为 mg/g, K_L 中的 Langmuir 常数, 单位为 L/mg。

根据 Langmuir 等温模型表达式所需参数, 将公式进行线性转换, 可以构建 Langmuir 等温模型的线性表达式, 如式(3):

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_0} + \frac{C_e}{q_0} \quad (3)$$

C_e/q_e 与 C_e 之间的图将产生一条斜率为 $1/q_0$ 的直线, 截距等于 $1/K_L q_0$ 的直线。

与 Langmuir 等温线不同, Freundlich 等温模型可以用于非均匀位点上的多层吸附。它假设吸附热分布和对非均匀表面的亲和度是不均匀的。Freundlich 等温模型表达式为:

$$q_e = b C_e^{1/n} \quad (4)$$

式中 q_e 是吸附平衡时单位重量吸附质吸附的量, 单位为 mg/g, C_e 是液相平衡浓度, 单位为 mg/L, b 是吸附能力, 单位为 L/mg, $1/n$ 是吸附强度或表面异质性。当 $0 < 1/n < 1$ 时, 吸附被认为是有利的。当 $1/n > 1$ 时发生不利的吸附, 当 $1/n = 1$ 时是不可逆的。线性化的形式可以写成:

$$\ln q_e = \ln b + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (5)$$

$\ln q_e$ 与 $\ln C_e$ 的图产生一条斜率为 $1/n$, 截距为 $\ln b$ 的直线。

3. 实验结果与分析

3.1. $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 对粘土基浆物性影响规律

Table 2. Performance changes of clay-based slurry after aging at 120°C

表 2. 120°C 老化后粘土基浆性能变化表

Na ₂ CO ₃ 加量	AV/mPa·s	PV/mPa·s	G'/G''/(Pa/Pa)	FL/mL	CO ₃ ²⁻ /(mg/L)	HCO ₃ ⁻ /(mg/L)	CO ₃ ²⁻ /HCO ₃ ⁻ /(mg/L)
0%	12	7	11/2	18	126	277	403
0.4%	7	3	0/0	25	820	744	1564
0.8%	11	9	13	33	1795	1415	3210
1.2%	15	11	15	39	3221	4602	7823
1.5%	18	12	23	42	3664	4882	8546
2.0%	24	13	32	44	4082	9205	13,287

由表 2 可知, 经过 120℃老化后, 粘土基浆性能随着污染程度的增加基础物性表现出恶化趋势, 且 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 存在临界浓度, CO_3^{2-} : 820, HCO_3^- : 744。

在 120℃老化后, $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 浓度为 1564 mg/L 以下时, 基浆表观粘度、塑性粘度和静切力都随 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 浓度的增加而下降。在大于 1564 mg/L 时, 基浆表观粘度随着 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 浓度的增加而增加, 且增幅较大; 塑性粘度则表现为先上升后保持稳定的趋势; 静切力表现为大幅增加, 且初切和终切曲线逐渐靠近, 说明体系具有较强的稳定强度。粘土基浆滤失量随着 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 浓度的增加而增加的趋势。在 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 浓度达到一定程度时, 滤失量达到 42 mL, 且逐渐平衡。

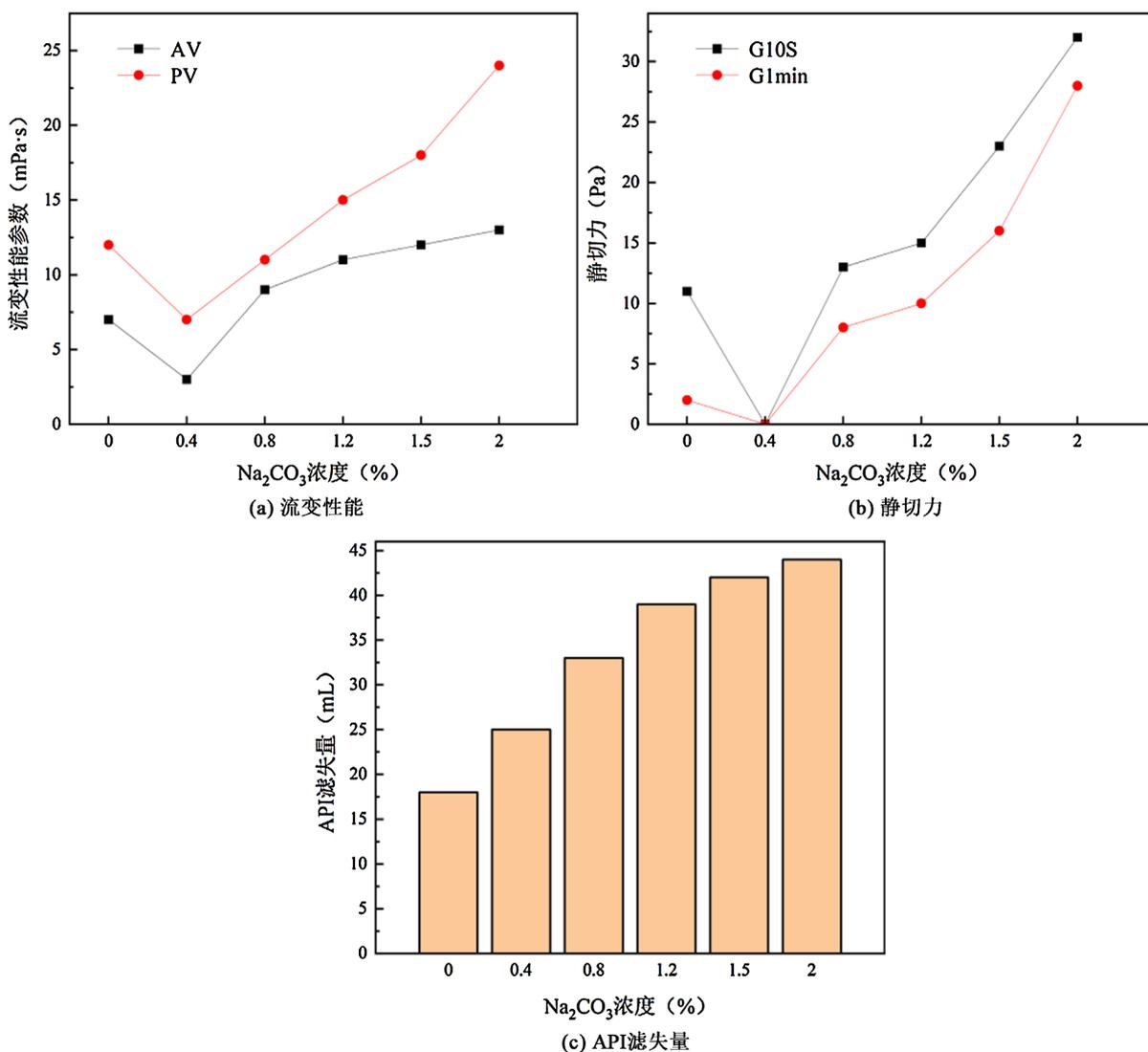


Figure 2. Variation of base slurry properties with Na_2CO_3 concentration after aging at 120°C

图 2. 120℃老化后基浆性能随 Na_2CO_3 浓度变化规律

3.2. $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 含量对处理剂 RSTF 吸附的影响

由图 2 可知, 粘土基浆受 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 污染存在临界浓度: CO_3^{2-} : 820, HCO_3^- : 744。因此为了分析 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 含量对处理剂 RSTF 吸附的影响, 根据 2.2.4 选取三个污染阶段, 分别为无污染、轻度污染、

重度污染对基浆中粘土颗粒吸附处理剂进行分析。

由图 3 可知,随着污染程度的升高,处理剂 RSTF 在粘土表面吸附量均表现出下降趋势,结合图 4 不同污染程度滤失性能对比,可判断出 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 和 RSTF 在粘土颗粒上发生了竞争吸附。随着 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 的浓度增加导致 RSTF 的吸附量减少,从而导致滤失量增大,无法达到最好的降滤失效果,使处理剂 RSTF 失去作用效果。

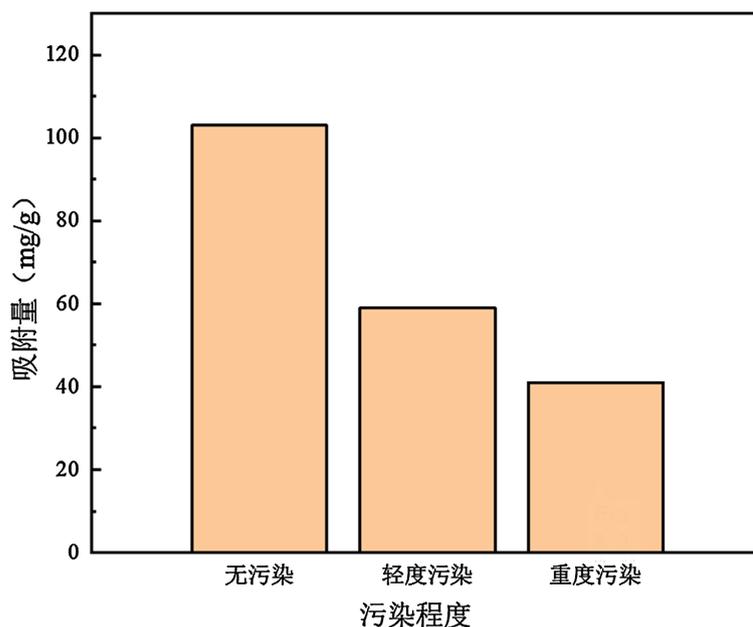


Figure 3. Changes in the amount of RSTF adsorbed in clay with the degree of CO_2 pollution

图 3. RSTF 在粘土中吸附量随 CO_2 污染程度的变化规律

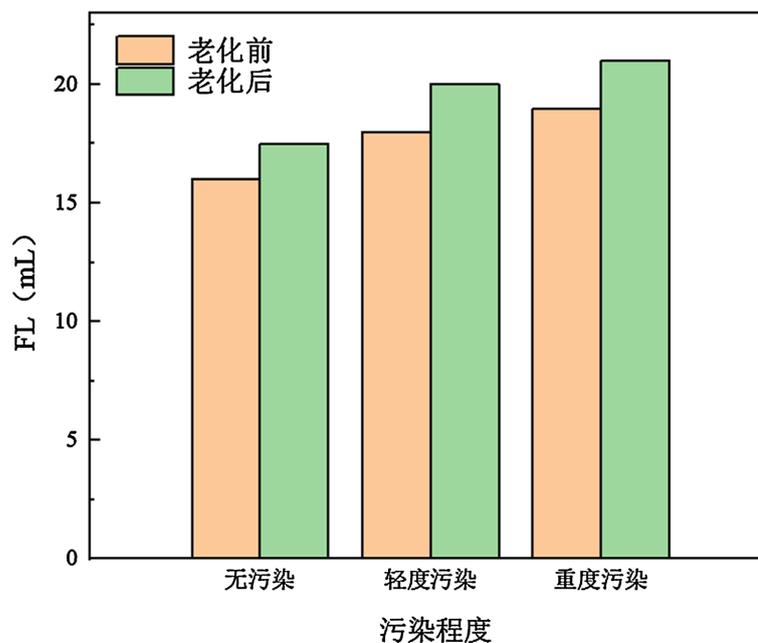


Figure 4. Changes in API filtration loss of drilling fluid (RSTF) before and after aging with contamination degree

图 4. 老化前后钻井液(RSTF)API 滤失量随污染程度的变化规律

3.3. $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 污染前后 RSTF 吸附等温线

Table 3. Adsorption amount of different RSTF concentrations
表 3. 不同 RSTF 浓度的吸附量

吸附量 /mg·g ⁻¹	200 mg·L ⁻¹	300 mg·L ⁻¹	400 mg·L ⁻¹	500 mg·L ⁻¹	600 mg·L ⁻¹	800 mg·L ⁻¹	1000 mg·L ⁻¹	1500 mg·L ⁻¹	2000 mg·L ⁻¹
无污染	31.20	42.43	50.44	69.44	88.62	93.21	102.14	103.21	103.87
重污染	13.01	15.00	20.62	28.95	33.57	39.86	40.00	42.59	43.25

粘土在不同 RSTF 浓度条件下的吸附量如表 3 所示, 实验结果表明, 当 RSTF 溶液浓度较低时, 吸附量较小, 随着处理剂 RSTF 浓度逐渐升高, 粘土吸附处理剂 RSTF 的量变大并且逐渐趋于平稳。在无污染条件下, 粘土基浆中 RSTF 浓度为 1000 mg/L 时达到吸附平衡。对粘土吸附 RSTF 的试验结果进行吸附等温线拟合, 本文拟合使用 Langmuir 和 Freundlich 模型。Langmuir 模型以 $1/C_e$ 为横坐标, $1/q_e$ 为纵坐标, Freundlich 模型以 $\ln C_e$ 为横坐标, $\ln q_e$ 为纵坐标, 进行直线拟合并求出 2 个模型的试验参数。粘土吸附 RSTF 的 2 种吸附等温线见图 5。粘土吸附 RSTF 的等温线利用 Langmuir 模型和 Freundlich 模型进行拟合, 得到两个模型的参数见表 4、表 5。

利用 Origin Pro 9.0 进行 Langmuir 模型和 Freundlich 模型线性拟合结果如图 5 所示, 实验结果表明, 在无污染和重污染条件下, RSTF 的 Langmuir 模型方程拟合度高, 分别为 97.554% 和 94.326%, Freundlich

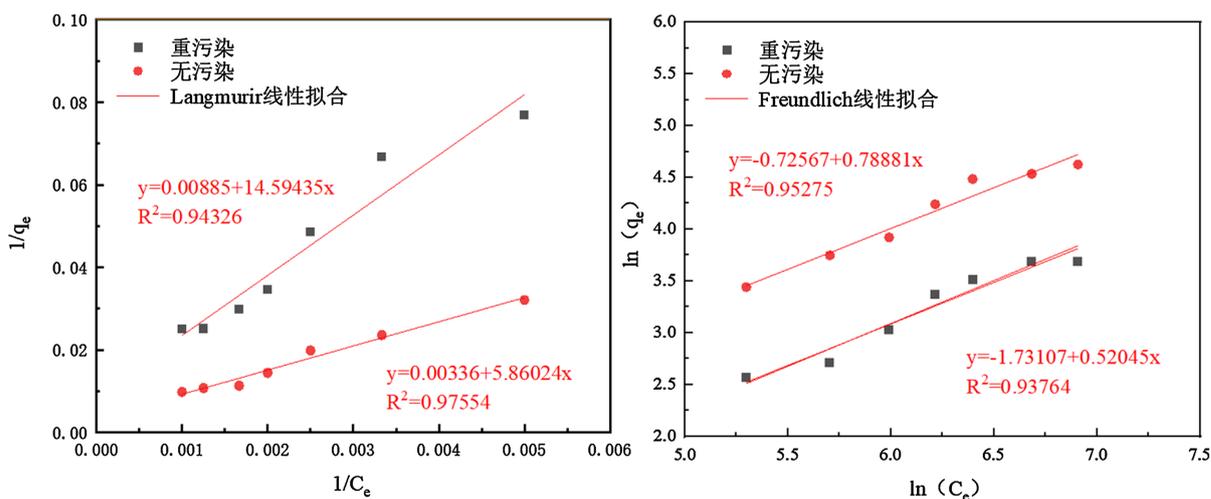


Figure 5. Isotherm adsorption formula fitting of RSTF solution

图 5. RSTF 溶液的等温线吸附公式拟合

Table 4. Langmuir adsorption isotherm model parameters

表 4. Langmuir 吸附等温线模型参数

参数	无污染	重污染
$K_L/(\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	1744.13412	1649.31178
$q_0/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	0.17064	0.06851
R^2	0.97554	0.94326
方程	$y = 0.00336 + 5.86024x$	$y = 0.00885 + 14.59435x$

Table 5. Freundlich adsorption isotherm model parameters
表 5. Freundlich 吸附等温线模型参数

参数	无污染	重污染
$1/n$	0.78881	0.52045
b	0.48400	0.17709
R^2	0.95275	0.93740
方程	$y = -0.72567 + 0.78881x$	$y = -1.73107 + 0.52045x$

模型方程拟合度为 95.275%和 93.740%。可见，粘土颗粒对 RSTF 的吸附趋向于 Langmuir 吸附模型，说明 RSTF 在粘土颗粒表面吸附比较均匀，吸附质分子间无相互作用，呈单分子层吸附特征为主，具备最大平衡吸附量，但在重度污染条件下，两种吸附模型拟合精度均有所下降，说明 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 污染对 RSTF 在粘土表面正常吸附产生了影响。在无污染和重污染两种条件下，粘土颗粒吸附 RSTF 的最大吸附量分别为 103.21 mg/g、43.25 mg/g，随着污染程度的升高，粘土颗粒对 RSTF 的吸附量出现了大幅降低，这也表明此过程是一个竞争吸附过程，阻碍了处理剂在粘土表面的吸附，污染条件不利于 RSTF 在钻井液中发挥作用。

3.4. 微观结构

从图 6 中可以看出粘土浆(无污染)以空间网状结构形成不规则结构，放大 5000 倍观察可知，粘土片状结构实际上是更小的片状粘土不规则堆积形成，同时未被污染的粘土基浆粘土表面堆积较为致密；在粘土浆受到严重污染后，片状结构表现更加分散、疏松，表现为空间网状结构，放大可以看出粘土浆被污染后形成的空间网状结构实际上是由比较小的颗粒聚集而成，架桥能力更强，因此表现出粘切更高。

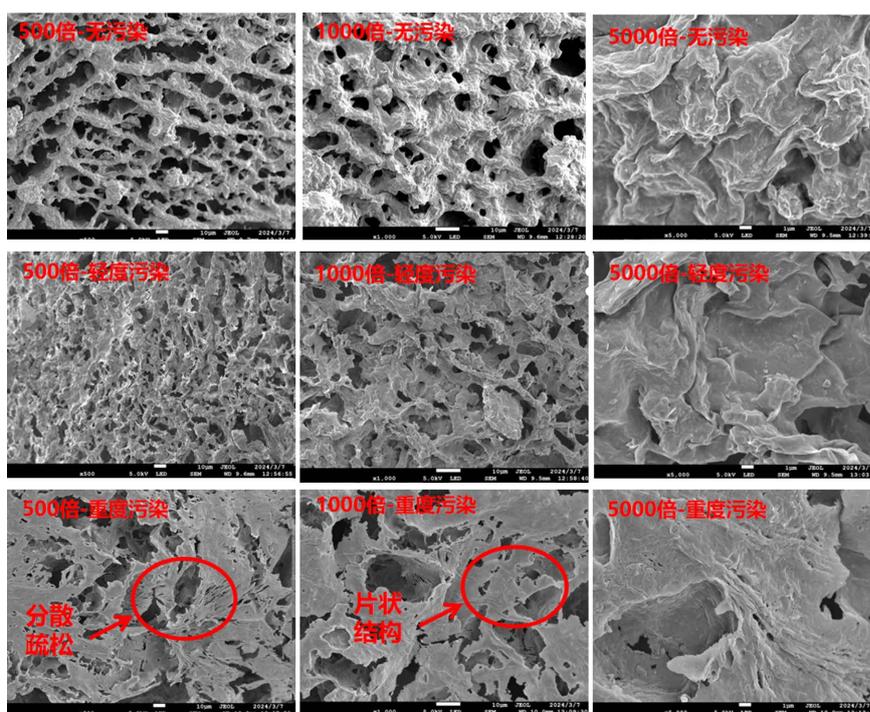


Figure 6. Clay microstructure under different pollution conditions
图 6. 不同污染条件下粘土微观结构

4. 结论

1) $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 对膨润土基浆污染存在临界浓度。在临界值前阶段, 体系流变性能变化较小, 更加可控, 超过临界之后流变、滤失性能表现出严重恶化。

2) 在污染前、污染后两种污染条件下, 处理剂 RSTF 在粘土表面吸附规律均趋向于 Langmuir 吸附模型, 粘土吸附处理剂 RSTF 的最大吸附量分别为 103.21 mg/g、43.55 mg/g。

3) 随着污染程度的增加, 处理剂 RSTF 在粘土表面吸附量大幅减少, 说明 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 在粘土表面发生竞争吸附。

4) 随着污染程度的增加, 粘土结构发生改变, 粘土颗粒聚集, 粘土颗粒形成网状卡片结构, 出现大量漏失通道, 导致钻井液流变、滤失性能出现严重恶化。

参考文献

- [1] 陈杰. 玛 18 井区水基钻井液碳酸氢根污染治理工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2023.
- [2] 杨晓博, 任佳萍. 钻井液常见污染中存在的漏洞及处理分析[J]. 火炮科技与市场, 2018(1): 113, 120.
- [3] 王平全. 钻井液处理剂及其作用原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- [4] 艾加伟. 水基钻井液 CO_2 污染机理及处理技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- [5] 冯丽, 雷伏涛, 祝学飞, 等. 碳酸根、碳酸氢根污染的钻井液处理及机理研究[J]. 天然气与石油, 2015, 33(2): 53-55, 88, 11.
- [6] 王磊. 端胺聚醚在蒙脱土颗粒上的吸附对蒙脱土分散体系稳定性的影响[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2012.
- [7] 徐晨阳, 黄志宇, 门欣, 等. 高密度钾聚磺钻井液体系受 CO_2 污染机理研究[J]. 应用化工, 2023, 52(2): 480-484.
- [8] 朱怀江, 蔡玉娥, 魏莹璐, 等. 紫外光谱法测定提高采收率用新型聚合物浓度[J]. 精细与专用化学品, 2004, 12(6): 19-22.
- [9] 周艳, 张建平, 罗学刚, 等. 有机蒙脱土对单宁酸的吸附性能[J]. 化工进展, 2014, 33(7): 1919-1924.
- [10] 李梅, 朱明璇, 王洪波, 等. 污泥对有机物的吸附动力学试验及模型构建[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(6): 2150-2158.
- [11] 闫佳, 张东晨, 徐敬尧, 等. 煤泥对含聚污水中聚丙烯酰胺的吸附动力学研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(2): 185-190.
- [12] 李宜强, 曲成永. 高岭土对聚丙烯酰胺静吸附与动滞留的影响[J]. 海洋石油, 2010, 30(2): 72-76.
- [13] 陈子聪, 章明清, 吴启堂, 等. 菜园土壤磷素解吸模型与淋溶流失预测[J]. 中国环境科学, 2007, 27(5): 686-692.
- [14] 李金雄, 潘涌璋. 膨润土对水中聚丙烯酰胺的吸附行为研究[J]. 工业用水与废水, 2010, 41(6): 64-67.
- [15] 朱诗杰, 叶仲斌, 宋瑞, 等. 树枝状疏水缔合聚合物的吸附行为[J]. 精细石油化工, 2021, 38(3): 12-17.