

# 多羟基高效页岩抑制剂的性能及机理研究

雷世平<sup>1,2</sup>, 王文彬<sup>1,2\*</sup>, 孟艾无<sup>1,2</sup>, 洪俊展<sup>1,2</sup>, 刘云林<sup>1,2</sup>, 单文军<sup>3</sup>

(1. 湖南省地球物理地球化学调查所, 湖南长沙 410114; 2. 湖南省绿色智能勘探工程技术研究中心, 湖南长沙 410114; 3. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083)

**摘要:**为解决深层页岩地层钻井井壁失稳难题,针对传统页岩抑制剂存在的抗温性能不足、防膨效果有限等问题,以三乙醇胺与二溴乙烷为原料,在温和条件下合成了一种多羟基高效页岩抑制剂,通过防膨率、抗温性、岩芯线性膨胀及滚动回收测试等系统评价其性能,并借助红外光谱、扫描电镜、X射线光电子能谱表征其结构与作用机理。结果表明:该抑制剂合成产率达98.7%,水溶性好,工艺温和,具备良好的工业化潜力;23%抑制剂水溶液室温防膨率达96.7%,140℃老化后防膨率仍达92.3%,140℃下页岩岩心滚动回收率达92.5%,线性膨胀量大幅降低,各指标均显著优于传统抑制剂。机理分析表明,其分子中的多羟基基团与页岩矿物表面的羟基形成氢键,质子化后的氨基产生静电吸附,共同在页岩表面形成致密的吸附膜,阻隔钻井液滤液向页岩内部侵入;同时,分子中的羟基与页岩矿物表面的硅羟基发生缩合反应,形成化学键合,进一步提升吸附膜的致密性和稳定性,共同赋予抑制剂在页岩表面强吸附与长效成膜的效果。本研究为深层复杂页岩地层钻井用抑制剂的研发提供了新的技术思路,具有良好的应用前景。

**关键词:**页岩抑制剂;井壁稳定;多羟基化合物;三乙醇胺;防膨性能;抗温性能;作用机理;钻井工程

**中图分类号:**TE254+.4;P634.6 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)03-0044-07

## Research on performance and action mechanism of polyhydroxy high-efficiency shale inhibitor

LEI Shiping<sup>1,2</sup>, WANG Wenbin<sup>1,2\*</sup>, MENG Aiwu<sup>1,2</sup>, HONG Junzhan<sup>1,2</sup>, LIU Yunlin<sup>1,2</sup>, SHAN Wenjun<sup>3</sup>

(1. Geophysical and Geochemical Survey Institute of Hunan Province, Changsha Hunan 410114, China; 2. Hunan Green Intelligent Exploration Engineering Technology Research Center, Changsha Hunan 410114, China; 3. Oil & Gas Survey Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To address the challenge of wellbore instability in drilling deep shale formations and overcome the shortcomings of conventional shale inhibitors, such as insufficient temperature resistance and limited anti-swelling efficiency, a highly efficient polyhydroxy shale inhibitor was synthesized under mild conditions using triethanolamine and 1,2-dibromoethane as raw materials. Its performance was systematically evaluated through tests including anti-swelling rate, temperature resistance, core linear expansion, and hot-rolling recovery. The structure and action mechanism were characterized using Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The results indicate that the inhibitor achieves a synthesis yield of 98.7%, exhibits good water solubility, and features a mild synthesis process, demonstrating great potential for industrialization. A 23% aqueous solution of the inhibitor exhibits an anti-swelling rate of 96.7% at room temperature and maintains

收稿日期:2026-03-16; 修回日期:2026-03-24 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.03.005

基金项目:湖南省地质院科研项目(编号:HNGSTP202616);国家自然科学基金青年科学基金项目(编号:41802196);中国地质调查局地质调查项目(编号:DD20242067)

第一作者:雷世平,男,畲族,1977年生,高级工程师,岩土与勘查技术专业,从事工程地质钻探与地质灾害防治相关的研究工作,湖南省长沙市天心区万家丽南路二段898号,30826260@qq.com。

通信作者:王文彬,男,汉族,1987年生,高级工程师,地质工程专业,长期从事钻探技术研究及施工管理工作,湖南省长沙市天心区万家丽南路二段898号,574937489@qq.com。

引用格式:雷世平,王文彬,孟艾无,等.多羟基高效页岩抑制剂的性能及机理研究[J].钻探工程,2026,53(3):44-50.

LEI Shiping, WANG Wenbin, MENG Aiwu, et al. Research on performance and action mechanism of polyhydroxy high-efficiency shale inhibitor[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(3):44-50.

92.3% after aging at 140 °C. Furthermore, the hot-rolling recovery of shale cores reaches 92.5% at 140 °C, with a significantly reduced linear expansion. All indicators are markedly superior to those of conventional inhibitors. Mechanism analysis reveals that the multiple hydroxyl groups in the molecule form hydrogen bonds with the hydroxyl groups on shale mineral surfaces, while the protonated amino groups generate electrostatic adsorption. Together, they form a dense adsorption film on the shale surface, blocking the invasion of drilling fluid filtrate. Simultaneously, the hydroxyl groups in the molecule undergo condensation reactions with the silanol groups on the shale surface to form chemical bonds, further enhancing the compactness and stability of the adsorption film. These synergistic effects endow the inhibitor with strong adsorption and long-lasting film-forming capabilities on the shale surface. This study provides a novel technical approach for the development of inhibitors used in drilling deep and complex shale formations, showing promising application prospects.

**Key words:** shale inhibitor; wellbore stability; polyhydroxy compound; triethanolamine; anti-swelling performance; temperature resistance; action mechanism; drilling engineering

## 0 引言

在全球油气资源勘探开发向深层、复杂地层推进的背景下,页岩地层钻井作业面临的井壁失稳问题愈发突出<sup>[1-3]</sup>。页岩地层富含具有强亲水性的蒙脱石、伊利石等黏土矿物,被钻井液侵入后易发生水化膨胀、分散剥落,导致井径扩大和卡钻、井漏等事故,增加钻井周期和成本的同时,还可能造成油气层污染<sup>[4-5]</sup>。据统计,全球钻井作业中,每年因页岩井壁失稳造成的经济损失超过数十亿美元,使其成为制约深层油气勘探开发的技术瓶颈<sup>[6-7]</sup>。

页岩抑制剂是维持页岩井壁稳定的核心处理剂,其性能直接决定了钻井作业的安全性与经济性<sup>[8]</sup>。目前,工业上常用的页岩抑制剂主要包括无机盐类、有机胺盐类、聚胺类、离子液体类等,但这些抑制剂在实际应用中仍存在诸多不足:无机盐类抑制剂(如KCl、NH<sub>4</sub>Cl)防膨效果有限,且易造成地层伤害;传统有机胺盐类抑制剂抗温性能较差,在120 °C以上高温环境中易分解失效;聚胺类抑制剂虽具有一定的抗温性和防膨性,但合成成本较高,难以大规模推广应用;离子液体类抑制剂虽性能优异,但存在生物降解性差、环保风险高等问题<sup>[9-11]</sup>。此外,单一作用机理的抑制剂难以应对深层页岩地层高温、高压、高盐的复杂环境,无法维持井壁长期稳定<sup>[12]</sup>。

多羟基化合物因分子结构中含有多个羟基,具有强亲水性和良好的吸附性能,在页岩抑制领域展现出广阔的应用前景<sup>[13-15]</sup>。羟基可与页岩矿物表面的羟基形成氢键,增强抑制剂在页岩表面的吸附能力,同时阻碍水分子与黏土矿物接触。三乙醇胺作为一种典型的多羟基化合物,具有来源广泛、成本

较低的优势,其分子中的羟基和氨基可提供多个吸附位点<sup>[16-18]</sup>;二溴乙烷具有高反应活性,可与三乙醇胺发生亲核取代反应,引入更多功能性基团,优化分子结构。据此,本文以三乙醇胺和二溴乙烷为原料,在乙醇溶液中合成了一种多羟基高效页岩抑制剂,系统研究其防膨性能、抗温性能、岩心稳定性能等综合性能,并通过多种表征手段揭示其作用机理,为该抑制剂在深层复杂页岩地层钻井中的应用提供理论依据与技术支持<sup>[19-20]</sup>。

## 1 实验过程

### 1.1 材料与仪器

实验材料:三乙醇胺(分析纯,纯度 $\geq 99\%$ )、二溴乙烷(分析纯,纯度 $\geq 98\%$ )、乙醇(分析纯,纯度 $\geq 99.7\%$ )、钠膨润土(工业级,蒙脱石含量 $\geq 90\%$ )、去离子水(自制)。实验用页岩取自某油田深层页岩地层,经粉碎、研磨后过200目筛,在105 °C烘箱中干燥24 h后备用。

实验仪器:DF-101S型集热式恒温加热磁力搅拌器、SHZ-D(III)型循环水式真空泵、DZF-6050型真空干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司)、WXG-4型显微熔点测定仪、ZNN-D6型旋转黏度计、NP-01型页岩膨胀仪、WG-DR型高温滚子加热炉、NicoletIS50型傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)、Quanta450FEG型扫描电子显微镜(SEM)、ESCALAB250Xi型X射线光电子能谱仪(XPS)。

### 1.2 抑制剂合成

在装有温度计、回流冷凝管和磁力搅拌器的三颈烧瓶中,加入一定量的乙醇作为溶剂,然后加入0.1 mol三乙醇胺,开启磁力搅拌器,升温至60 °C。

将0.05 mol二溴乙烷溶解于适量乙醇中,通过恒压滴液漏斗缓慢滴加至三颈烧瓶中,滴加时间控制在1 h内。滴加完成后,升温至80 ℃,恒温反应4 h。反应结束后,冷却至室温,减压蒸馏除去溶剂乙醇和未反应的原料,得到淡黄色黏稠状液体产物,即为多羟基页岩抑制剂。计算合成产率,并通过熔点测定仪测定产物熔点,验证产物纯度。经测定,该抑制剂合成产率高达98.7%,熔点为58~60 ℃。

在合成过程中,本工艺所用三乙醇胺、二溴乙烷、乙醇溶剂均为大宗工业级化学品,市场供应充足,无昂贵辅料添加。合成反应为常压体系,最高反应温度80 ℃,无高压、超高温、无氧保护等苛刻工况,设备要求低、生产能耗小;反应过程无有毒有害副产物生成,三废处理成本极低,具备规模化工业生产的成本优势。

### 1.3 性能测试方法

#### 1.3.1 防膨性能测试

按照《油气田压裂酸化及注水用粘土稳定剂性能评价方法》(SY/T 5971—2016)进行防膨率测试。准确称取2.0 g钠膨润土,置于页岩膨胀仪的样品池中,压实至恒定高度 $h_0$ 。分别配制质量分数为5%、10%、15%、20%、23%、25%的抑制剂水溶液,将不同浓度的抑制剂水溶液加入样品池中,使溶液完全覆盖膨润土样品,在室温下静置,记录不同时间(30、60、120、240 min)的膨润土膨胀高度 $h_1$ 。同时以去离子水作为空白对照,其膨润土最终膨胀高度 $h_2$ ,计算防膨率 $\eta_1$ :

$$\eta_1 = (h_2 - h_1) / (h_2 - h_0) \times 100\% \quad (1)$$

#### 1.3.2 抗温性能测试

将23%抑制剂水溶液与页岩粉按质量比10:1混合,置于高温滚子加热炉中,分别在80、100、120、140、160 ℃温度下老化16 h。老化结束后,冷却至室温,按照上述防膨率测试方法,测定老化后抑制剂水溶液的防膨率,评价其抗温性能。同时以传统KCl抑制剂(20%水溶液)作为对比样,进行相同条件下的抗温性能测试。

#### 1.3.3 岩心稳定性能测试

采用滚动回收测试评价抑制剂对页岩的稳定性能。取实验用页岩岩心,加工成直径25 mm、长度50 mm的岩心柱,称取其质量 $m_0$ 。岩心柱经机械加工后,先用600目碳化硅砂纸均匀打磨端面及外圆柱面,彻底去除切割产生的毛刺、微裂纹与表面

松散碎屑;随后用无水乙醇超声冲洗3次,去除表面残留岩粉;置于105 ℃真空干燥箱中恒温干燥12 h,取出后放入干燥器冷却至室温再进行称重,确保所有岩心样品初始状态一致。将岩心柱置于装有23%抑制剂水溶液的高温滚子加热炉中,140 ℃、120 r/min滚动16 h。滚动结束后,取出岩心柱,用清水冲洗干净,晾干后称取其质量 $m_1$ ,计算岩心滚动回收率 $\eta_2$ :

$$\eta_2 = (m_1 / m_0) \times 100\% \quad (2)$$

同时进行岩心线性膨胀测试,将页岩岩心加工成直径25 mm、长度10 mm的试样,置于页岩膨胀仪中,加入23%抑制剂水溶液,在140 ℃高温条件下,记录不同时间的岩心膨胀量,评价其长期稳定性能。

### 1.4 机理研究

FT-IR分析:取适量合成的多羟基页岩抑制剂样品,与KBr混合压片,在4000~400  $\text{cm}^{-1}$ 波数范围内进行红外光谱扫描,分析样品的化学结构,验证反应是否发生及官能团是否存在;同时对反应原料三乙醇胺和二溴乙烷进行红外光谱扫描,进行对比分析。SEM分析:取空白组页岩样品和经23%抑制剂水溶液浸泡后的页岩样品,经喷金处理后,置于扫描电子显微镜下观察页岩表面微观形貌的变化,分析抑制剂在页岩表面的吸附情况及对页岩结构的影响。XPS分析:对经23%抑制剂水溶液浸泡后的页岩样品表面进行X射线光电子能谱分析,测定元素组成与化学结合状态,揭示抑制剂与页岩矿物表面的相互作用机制。

## 2 抑制剂性能分析

### 2.1 抑制剂基本性能

该多羟基页岩抑制剂为淡黄色黏稠状液体,易溶于水、乙醇等极性溶剂,具有良好的水溶性;合成产率高达98.7%,表明该合成工艺具有较高的原料利用率和经济性;熔点为58~60 ℃,纯度较高,无明显杂质。其核心性能指标(23%抑制剂水溶液防膨率96.7%、抗温性能达140 ℃)均优于传统页岩抑制剂,展现出优异的综合性能。本文所有性能测试均设置3组独立平行样,最终结果取算术平均值,测试数据相对标准偏差控制在 $\pm 2\%$ 以内,实验结果具有良好的重复性与可靠性。

### 2.2 防膨性能分析

多羟基页岩抑制剂不同浓度水溶液的防膨率

测试结果如图1所示。由图1可知,随着抑制剂浓度的增加,防膨率逐渐升高。当抑制剂浓度低于20%时,防膨率提升较为显著;当浓度达到23%时,防膨率达到96.7%;继续增加浓度至25%,防膨率提升幅度较小,趋于稳定。这是因为当抑制剂浓度较低时,分子数量不足,无法在页岩矿物表面形成完整的吸附膜,防膨效果有限;随着浓度增加,抑制剂分子在页岩表面的吸附量增加,逐渐形成致密的吸附膜,阻碍水分子侵入,防膨率显著提升;当浓度达到饱和后,吸附达到平衡状态,防膨率不再明显增加。从时间变化来看,防膨率在前期(30~120 min)增长较快,120 min后趋于稳定,表明该抑制剂能够快速发挥防膨作用,且具有长期稳定的防膨效果。该抑制剂在同等浓度下的防膨效果显著优于下文所述的KCl、小分子有机胺及聚阳离子类传统抑制剂,展现出极强的黏土水化抑制能力。

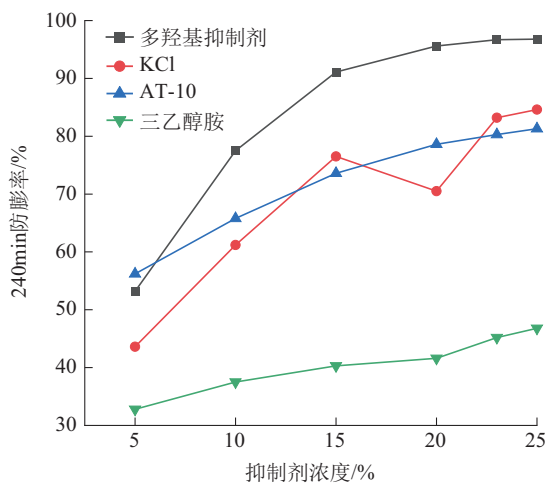


图1 室温下不同浓度页岩抑制剂的防膨率测试结果

Fig.1 Test Results of anti-swelling rate of shale inhibitors with various concentrations at room temperature

### 2.3 抗温性能分析

多羟基页岩抑制剂(23%抑制剂水溶液)在不同温度老化后的防膨率测试结果如图2所示。由图2可知,该抑制剂在80~140℃老化后,防膨率均保持在90%以上;当温度为140℃时,防膨率仍达92.3%,表明其具有优异的抗温性能。而传统KCl抑制剂(20%水溶液)在温度超过120℃后,防膨率显著下降,140℃老化后防膨率仅为65.8%。这是因为该多羟基抑制剂分子结构中含有稳定的C-O键和C-N键,在高温环境下不易分解,能够保持稳

定的化学结构和吸附性能;而KCl在高温下易发生电离平衡移动,且吸附作用较弱,高温下易从页岩表面脱附,导致防膨效果下降。该抑制剂优异的抗温性能使其能够满足深层高温页岩地层的钻井需求。常用小分子有机胺类抑制剂三乙醇胺、聚阳离子类抑制剂聚季铵盐AT-10,在140℃老化后防膨率分别为62.1%、76.8%,均显著低于本文合成的多羟基抑制剂。其核心原因在于,传统小分子抑制剂吸附位点少、高温下易脱附,聚阳离子类抑制剂高温下易发生分子链降解。而本文多羟基抑制剂分子结构中稳定的C-O键、C-N键与多吸附位点设计,可保障其在高温环境下的结构稳定性,进一步证实了该抑制剂在深层高温地层中的应用优势。

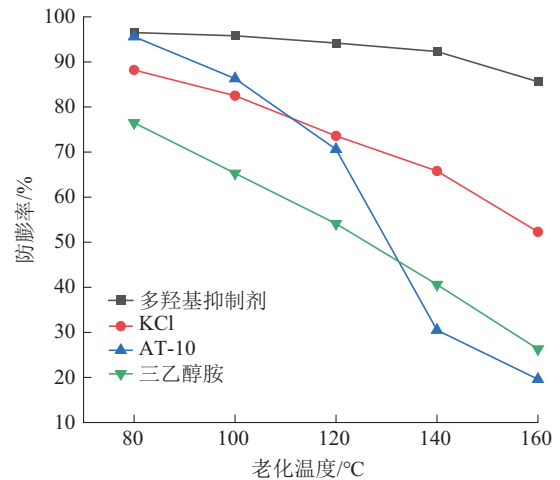


图2 多羟基页岩抑制剂与传统抑制剂抗温性能对比

Fig.2 Comparison of temperature resistance performance between polyhydroxy shale inhibitor and conventional inhibitors

### 2.4 岩心稳定性分析

多羟基页岩抑制剂(23%抑制剂水溶液)对页岩岩心的滚动回收测试和线性膨胀测试结果如表1所示。由表1可知,在140℃高温条件下,经该抑制剂水溶液浸泡滚动16 h后,页岩岩心的滚动回收率达92.5%,远高于空白组(去离子水)的45.8%;岩心线性膨胀量在240 min时仅为0.8 mm,而空白组的膨胀量达5.2 mm。这表明该抑制剂能够有效抑制页岩岩心的水化膨胀和分散剥落,对页岩井壁具有良好的稳定作用。其原因在于抑制剂分子在页岩岩心表面形成了致密的吸附膜,不仅阻碍了水分子的侵入,还增强了页岩颗粒之间的黏结力,从而提

高了页岩岩心的结构稳定性。KCl、三乙醇胺、AT-10的岩心滚动回收率分别为65.5%、68.9%、78.5%，240 min岩心线性膨胀量分别达1.9、1.3、1.2 mm，抑制效果远不及本文合成的多羟基抑制剂。这是因为该抑制剂可通过多基团协同吸附，在页岩岩心表面形成更致密、更耐高温的吸附膜，不仅能物理阻隔水分子侵入，还能大幅增强页岩颗粒间的黏结力，从根本上抑制页岩的水化分散与剥落坍塌。

表1 140℃下页岩岩心稳定性测试结果

Table 1 Test results of shale core stability at 140℃

抑制剂	滚动回收率/%	60 min 岩心膨胀量/mm	120 min 岩心膨胀量/mm	240 min 岩心膨胀量/mm
多羟基抑制剂	92.5	0.3	0.5	0.8
无(去离子水)	45.8	2.1	3.6	5.2
KCl	65.5	1.6	1.8	1.9
三乙醇胺	68.9	0.9	1.1	1.3
AT-10	78.5	0.6	0.8	1.2

### 3 抑制剂作用机理分析

#### 3.1 FT-IR分析

多羟基页岩抑制剂及原料三乙醇胺、二溴乙烷的FT-IR光谱如图3所示。由图3可知，三乙醇胺的红外光谱中，3350  $\text{cm}^{-1}$ 附近出现强而宽的羟基(-OH)伸缩振动峰，1050  $\text{cm}^{-1}$ 附近出现C-O伸缩振动峰；二溴乙烷的红外光谱中，700  $\text{cm}^{-1}$ 附近出现C-Br伸缩振动峰。合成产物的红外光谱中，3350  $\text{cm}^{-1}$ 附近仍存在羟基伸缩振动峰，但峰形略有变窄，表明产物中仍含有大量羟基；1050  $\text{cm}^{-1}$ 附近的C-O伸缩振动峰强度增强，同时在1380  $\text{cm}^{-1}$ 附近出现了新的C-N伸缩振动峰，700  $\text{cm}^{-1}$ 附近的C-Br伸缩振动峰消失。这表明三乙醇胺与二溴乙烷发生了亲核取代反应，二溴乙烷分子中的溴原子被三乙醇胺分子中的氨基取代，形成了含有多个羟基和氨基的多羟基化合物，成功合成了目标产物。3350  $\text{cm}^{-1}$ 处的多羟基强特征峰是抑制剂与页岩矿物形成氢键吸附的核心位点，羟基数量越多，氢键吸附能力越强；1380  $\text{cm}^{-1}$ 处新增的C-N特征峰证实了阳离子基团成功生成，是静电吸附的核心结构，保障了抑制剂在高温下的吸附稳定性。

#### 3.2 SEM分析

空白组和经23%多羟基抑制剂水溶液浸泡后

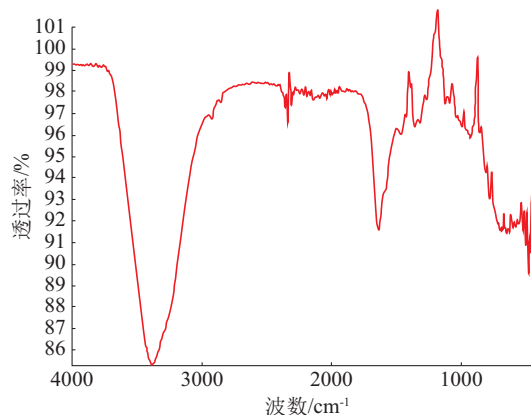
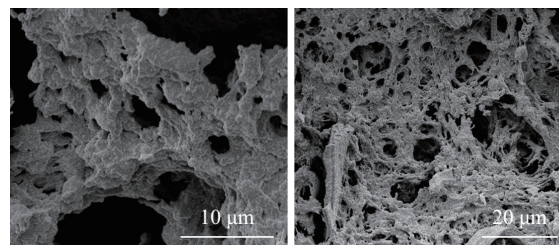


图3 多羟基页岩抑制剂及原料的FT-IR光谱图

Fig.3 FT-IR spectra of polyhydroxy shale inhibitors and its raw materials

的页岩样品的SEM形貌如图4所示。由图4(a)可见，空白组页岩样品表面粗糙，存在大量孔隙和裂隙，黏土矿物颗粒松散堆积，易发生分散剥落；与图4(b)对比可知，空白组页岩样品表面的大量孔隙与裂隙是水分子侵入、黏土水化膨胀的主要通道，经抑制剂处理后，页岩表面孔隙、裂隙被致密吸附膜填充封堵，黏土颗粒黏结紧密，从微观结构上阻断了水化路径。



(a)空白组 (b)抑制剂浸泡后

图4 页岩样品的SEM形貌

Fig.4 SEM morphology of shale samples

#### 3.3 XPS分析

经23%多羟基抑制剂水溶液浸泡后的页岩样品表面的XPS分析结果如图5所示。在样品表面检测到C、O、N、Si、Al等元素，其中N元素来自抑制剂分子中的氨基，表明抑制剂分子成功吸附在页岩表面。高分辨率XPS光谱中，O元素的结合能出现了偏移，表明抑制剂分子中的羟基与页岩矿物表面的羟基发生了氢键作用；N元素的结合能也出现了特征峰，证实抑制剂分子中的氨基与页岩矿物表面的负电荷发生了静电吸附作用。此外，检测到Si-O-C

键的特征峰,表明抑制剂分子中的羟基与页岩矿物表面的硅羟基发生了缩合反应,形成了化学键合,进一步增强了吸附稳定性,协同作用共同赋予了抑制剂在页岩表面强吸附与长效成膜的效果。

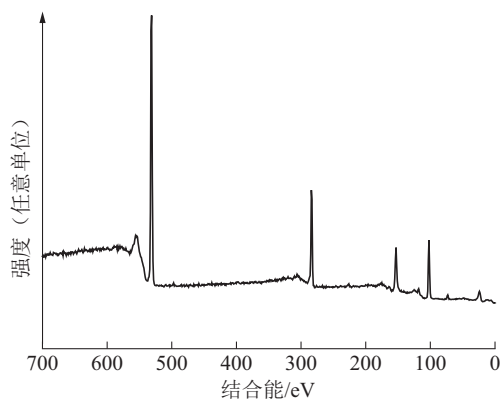


图5 抑制剂浸泡后页岩样品的XPS光谱  
Fig.5 XPS spectra of shale samples after soaking with inhibitor

### 3.4 小结

综合以上表征分析,多羟基高效页岩抑制剂的作用机理可总结为以下3点:(1)抑制剂分子中的多个羟基可与页岩矿物表面的羟基形成强烈的氢键作用,使抑制剂分子快速吸附在页岩表面;(2)抑制剂分子中的氨基质子化后带正电荷,可与页岩矿物表面(主要为黏土矿物)的负电荷发生静电吸附,进一步增强吸附能力,使吸附膜更加稳定;(3)抑制剂分子通过氢键和静电吸附在页岩表面形成致密的吸附膜,填补页岩表面的孔隙和裂隙,物理阻隔钻井液滤液侵入页岩内部;同时,抑制剂分子中的羟基与页岩矿物表面的硅羟基发生缩合反应,形成化学键合,进一步提升吸附膜的致密性和稳定性,协同作用共同赋予了抑制剂在页岩表面强吸附与长效成膜的效果。

## 4 结论

(1)以三乙醇胺和二溴乙烷为原料,在乙醇溶液中成功合成了一种多羟基高效页岩抑制剂,合成产率高达98.7%,产物纯度高、水溶性好;合成原料为大宗工业化学品,反应工况温和,能耗与三废处理成本低,具备良好的工业化生产潜力。

(2)性能测试表明,该抑制剂综合性能优异,23%抑制剂水溶液的防膨率达96.7%,能够快速、

长效发挥防膨作用;抗温性能突出,140℃高温老化后防膨率仍达92.3%;对页岩具有良好的稳定作用,140℃下滚动回收率达92.5%,岩心线性膨胀量显著降低,性能优于常用的KCl、小分子有机胺、聚阳离子类传统抑制剂。

(3)机理研究揭示,该抑制剂通过氢键吸附、静电吸附及化学成膜与物理阻隔的协同作用实现了高效的页岩抑制效果:羟基与页岩矿物羟基形成氢键,氨基与页岩表面负电荷发生静电吸附,快速稳定吸附于页岩表面;同时形成致密吸附膜并发生化学键合,有效阻隔水分子侵入,增强页岩颗粒黏结力。

(4)该多羟基高效页岩抑制剂具有优异的防膨性能、抗温性能和岩心稳定性能,能够满足深层高温复杂页岩地层的钻井需求,具有广阔的工程应用前景。后续将持续优化合成路线,进一步降低生产成本,使后续研究方向更具针对性与可落地性。

## 参考文献(References):

- [1] 程涌,郭宇丰,陈国栋,等.中国页岩气资源潜力、分布及特点[J].昆明冶金高等专科学校学报,2017,33(5):17-24.  
CHENG Yong, GUO Yufeng, CHEN Guodong, et al. On resource potential, distribution and characteristics of shale gas in China [J]. Journal of Kunming Metallurgy College, 2017, 33 (5):17-24.
- [2] 赵洪波,朱芝同,梁涛,等.页岩气基础地质调查钻井技术研究进展及展望[J].中国地质,2023,50(2):376-394.  
ZHAO Hongbo, ZHU Zhitong, LIANG Tao, et al. Shale gas geological survey drilling technologies: Progress and prospect [J]. Geology in China, 2023, 50(2):376-394.
- [3] 王胜建,迟焕鹏,庞飞,等.黔北正安地区页岩气钻探工程难点与对策研究[J].地质与勘探,2023,59(1):162-169.  
WANG Shengjian, CHI Huanpeng, PANG Fei, et al. Challenges and solutions of drilling engineering in the Zheng'an area of northern Guizhou Province [J]. Geology and Exploration, 2023, 59(1):162-169.
- [4] 王宗友,陈刚,乔生贵.页岩气调查黔地4井钻探技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(2):1-6.  
WANG Zongyou, CHEN Gang, QIAO Shenggui. A brief discussion on the drilling technology of shale gas survey in Qiandi Well-4 [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(2):1-6.
- [5] 万夫磊,王培钢,范生林.川南页岩气钻井井漏特征及堵漏技术研究与应用[J].石油科技论坛,2022,41(2):85-91.  
WAN Fulei, WANG Peigang, FAN Shenglin. Leakage characteristics of shale gas wells drilled in southern Sichuan and plugging technology research and application [J]. Oil Forum, 2022, 41(2):85-91.
- [6] 张统得,程悦瀚,赵瞻,等.四川盆地西南缘页岩气地质调查川

- 马页1井钻井关键技术[J]. 钻探工程, 2025, 52(2): 10-19.  
ZHANG Tongde, CHENG Yuehan, ZHAO Zhan, et al. Key drilling technologies for Well Chuanmaye 1: geological survey of shale gas in the southwest margin of Sichuan Basin[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(2): 10-19.
- [7] 樊腊生, 刘伟, 张统得, 等. 四川沐川大口径地质调查井(川沐地2井)钻探施工技术[J]. 钻探工程, 2021, 48(12): 43-53.  
FAN Lasheng, LIU Wei, ZHANG Tongde, et al. Drilling of a large diameter geological survey well (Well Chuanmudi-2) in Muchuan county of Sichuan Province[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(12): 43-53.
- [8] 刘凤双, 王皓, 尹飞, 等. 承德宽城坳陷重点地区页岩油气资源调查井冲洗液技术研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(2): 51-58.  
LIU Fengshuang, WANG Hao, YIN Fei, et al. Research on flushing fluid technology for shale oil and gas resources survey well in key areas of Kuancheng Depression in Chengde[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(2): 51-58.
- [9] 闫家, 刘蓓, 曹龙, 等. 下扬子地区页岩气地质调查皖望地3井钻井设计与施工技术[J]. 钻探工程, 2023, 50(3): 74-82.  
YAN Jia, LIU Bei, CAO Longlong, et al. Drilling design and construction technology of shale gas geological survey Well Wangwangdi-3 in the Lower Yangtze Block[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3): 74-82.
- [10] 刘俊辉, 李晓东. 广西苗儿山大厚度水敏性地层冲洗液技术研究及应用[J]. 钻探工程, 2024, 51(5): 154-162.  
LIU Junhui, LI Xiaodong. Research and application of drilling fluid technology for thick water-sensitive formations in the Miaoershan area of Guangxi[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5): 154-162.
- [11] 王中华. 国内钻井液技术现状与发展建议[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 114-123.  
WANG Zhonghua. Current situation and development suggestions for drilling fluid technologies in China[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 114-123.
- [12] 高斐, 何云, 董淼, 等. 一种新型双季铵盐页岩抑制剂的制备及其作用机理[J]. 中国科技论文, 2023, 18(6): 694-698.  
GAO Fei, HE Yun, DONG Miao, et al. Preparation and mechanism of a novel double quaternary ammonium salt shale inhibitor[J]. China Sciencepaper, 2023, 18(6): 694-698.
- [13] Klungtvedt K R, Saasen A. Comparison of lost circulation material sealing effectiveness in water-based and oil-based drilling fluids and under conditions of mechanical shear and high differential pressures[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2022, 144(12): 123011.
- [14] 韩月, 郝树青, 全方凯. 煤层气钻井低密度水基成膜钻井液研制与性能测试[J]. 中国科技论文, 2017, 12(9): 1059-1063.  
HAN Yue, HAO Shuqing, QUAN Fangkai. Preparation and performance measurement of low density film-formed water-based drilling fluid for coalbed methane drilling[J]. China Sciencepaper, 2017, 12(9): 1059-1063.
- [15] Al-Bidry M A, Hamied R S. Utilizing attapulgite as anti-spill liners of crude oil[J]. Baghdad Science Journal, 2022, 19(3): 14.
- [16] Zhang W Y, Qian L B, Ouyang D, et al. Effective removal of Cr (VI) by attapulgite-supported nanoscale zero-valent iron from aqueous solution: enhanced adsorption and crystallization[J]. Chemosphere, 2019, 221: 683-692.
- [17] 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.  
DU Weichao, SUN Jinsheng, PU Xiaolin, et al. Research status and development trends of clay hydration inhibitor at home and abroad[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(10): 4013-4021.
- [18] 刘敬平, 孙金声. 页岩气藏地层井壁水化失稳机理与抑制方法[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(3): 25-29.  
LIU Jingping, SUN Jinsheng. Borehole wall collapse and control in shale gas well drilling[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(3): 25-29.
- [19] 伍晓龙, 朱芝同, 董向宇, 等. 小口径油气地质调查井的问题与工程实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(11): 27-32.  
WU Xiaolong, ZHU Zhitong, DONG Xiangyu, et al. Problems and field cases of small-diameter oil and gas geological survey wells[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(11): 27-32.
- [20] 任正炼, 蹇黎明, 王胜, 等. 页岩气钻探胶凝时控水泥基护壁堵漏材料研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(2): 115-123.  
REN Zhenglian, JIAN Liming, WANG Sheng, et al. Study on cement-based materials with controllable gelation time for wellbore protection and leakage sealing in shale gas drilling[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(2): 115-123.

(编辑 王跃伟)