

抗温耐盐降滤失剂的合成及评价

丁玉欢¹, 程云^{2*}, 马诚¹, 吴限¹, 邓晓琦^{1,3}

(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;

3. 中石化(大连)石油化工研究院, 辽宁 抚顺 113001)

摘要:以丙烯酰胺(AM)和2-丙烯酰胺基-2-甲基丙烷磺酸(AMPS)为单体,创新性地引入纳米碳酸钙作为无机核芯,通过包覆聚合合成了一种抗温耐盐降滤失剂(DY)。傅里叶变换红外光谱(FT-IR)与热重分析(TG)证实其分子结构正确且热稳定性优良($T_{5\%}=205.29^{\circ}\text{C}$)。性能评价表明,DY在 210°C 、15% NaCl条件下仍保持优异性能;加入2.5% DY后,老化后常温常压(API)滤失量仅为11.2 mL。结合扫描电子显微镜(SEM)、比表面积与孔径分析仪(BET)、粒度分布与Zeta电位等表征,系统揭示了DY通过形成致密滤饼、优化颗粒分布与增强静电稳定性的多重作用机制,为高温高盐钻井液提供了新型高效处理剂。

关键词:降滤失剂;碳酸钙;抗高温;耐盐;滤饼

中图分类号:TE416

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)08-0192-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.08.032

Synthesis and evaluation of high-temperature and salt-resistant filtration reducers

DING Yu-huan¹, CHENG Yun^{2*}, MA Cheng¹, WU Xian¹, DENG Xiao-qi^{1,3}

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

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

3. Sinopec (Dalian) Research Institute of Petroleum and Petrochemicals, Fushun 113001, China)

Abstract: Using acrylamide (AM) and 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid (AMPS) as monomers, nano-calcium carbonate was innovatively introduced as an inorganic core, and a high-temperature and salt-resistant fluid loss agent (DY) was synthesized via encapsulation polymerization. Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) and thermogravimetric analysis (TG) confirmed its correct molecular structure and excellent thermal stability ($T_{5\%}=205.29^{\circ}\text{C}$). Performance evaluation demonstrated that DY maintains outstanding performance even under conditions of 210°C and 15% NaCl; with the addition of 2.5% DY, the API filtration loss after aging was only 11.2 mL. Combined with characterization techniques such as scanning electron microscopy (SEM), specific surface area and pore size analyzer (BET), particle size distribution, and Zeta potential analysis, the multiple mechanisms of DY were systematically elucidated, including the formation of a compact filter cake, optimization of particle distribution, and enhancement of electrostatic stability. This provides a novel and efficient treatment agent for high-temperature and high-salinity drilling fluids.

Key words: filtration reducers; CaCO_3 ; high-temperature resistance; salt resistance; filter cake

由于在浅中埋藏地层中发现新的大规模油气藏越来越困难,全球油气勘探已扩展至深部和超深地层^[1]。随着全球油气勘探向深层、超深层储层转移,高温、高盐环境对钻井液性能提出了严峻挑战^[2-4]。钻井液在高温高压条件下易发生流失,不仅增加钻井成本,还可能造成环境污染^[5-7]。对于油基钻井液来说,高昂的成本和环境影响限制了其使用^[8-9]。水基钻井液(WBDF)虽具有环境友好和成本优势,但其高温高盐条件下的滤失控制问题亟待解决。随着井深的增加,温度会不断升高,钻井液的循环时间也会延长,任何钻井活动的成功主要取决于钻井液的特性,钻井液的滤失性能是必不可少

的,因此,降滤失剂成为一种重要的处理剂^[10-13],可以通过提高滤液粘度,通过吸附形成柔性弹性吸附层,堵塞泥饼孔来达到减少失水的效果^[14],并且会在井壁上形成一层薄而低渗透性的滤饼,有效降低滤饼的孔隙率和孔径,进一步减少失水改变滤饼结构,稳定井壁、确保钻井安全和效率以及避免地层破坏^[15]。

传统聚合物降滤失剂在极端环境下性能显著下降,因此设计开发一种抗温耐盐的新型降滤失剂成为研究热点^[16]。本研究创新性地采用纳米 CaCO_3 为核、丙烯酰胺(AM)/2-丙烯酰胺基-2-甲基丙烷磺酸(AMPS)共聚物为壳的复合结构,通过包覆聚合工艺,显著提升了聚合物的热稳定性和耐盐性,解

收稿日期:2025-10-13;修回日期:2026-06-01

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:丁玉欢(2001-),女,硕士生,研究方向为钻井液的合成,D15042140204@126.com;程云(1971-),男,硕士,实验师,研究方向为油田化学品的研究,通讯联系人,chy-ah@163.com。

决了传统聚合物在高温高盐条件下易降解、滤失控制能力下降的问题,以期为石油钻井作业提供更有力的技术支持。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

丙烯酰胺 (AM)、2-丙烯酰胺基-2-甲基丙烷磺酸 (AMPS)、碳酸钙 (CaCO_3)、过硫酸钾 ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$)、氯化钠 (NaCl)、无水碳酸钠 (Na_2CO_3)、无水亚硫酸钠 (Na_2SO_3) 分析纯。

GJS-B12K 型变频高速搅拌机、GRL-BX3 型便携式滚子加热炉、ZNN-D6 六速旋转黏度计,青岛百瑞达石油机械制造有限公司;D2004W 型电动搅拌机,上海梅浦仪器制造有限公司。

1.2 降滤失剂 (DY) 的合成

1.2.1 分子结构设计依据

本研究选用 AM 和 AMPS 作为共聚单体,其中 AM 提供强吸附性,AMPS 引入磺酸基团增强耐盐性;纳米 CaCO_3 为无机核芯,不仅提供刚性支撑,抑制聚合物链在高温下的热运动,还能通过物理填充作用优化滤饼结构,合成机理见图 1。

图 1(a)展示了 AM 与 AMPS 的自由基共聚过程;图 1(b)示意了聚合物链通过物理吸附与氢键作用包覆在纳米 CaCO_3 表面,形成核壳结构。

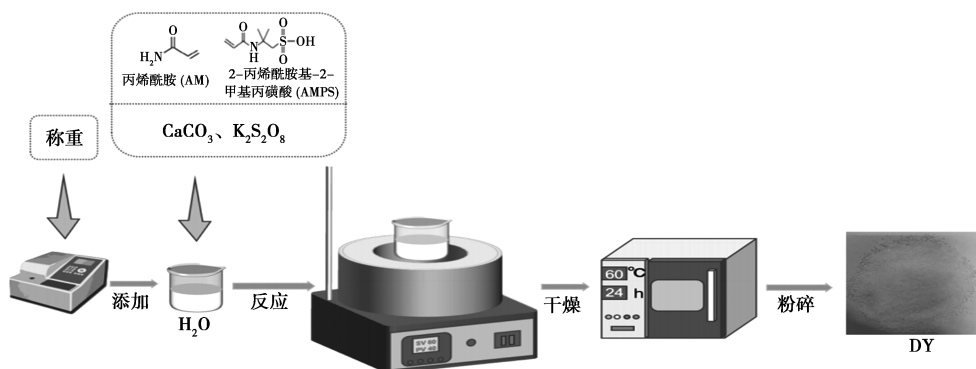


图 1 降滤失剂 (DY) 的合成

1.2.2 合成流程

(1)称取 2 g 干燥处理后的纳米碳酸钙和适量的去离子水,加入到烧杯中,进行超声和匀浆处理,得到相对均匀的预溶液。

(2)再称取质量比 16:3 的 AM、AMPS 和 0.5 g 引发剂 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$,加入到有上述预溶液的烧杯中,将烧杯放入恒温加热磁力搅拌器中,待反应完成。

(3)所得产物放于真空干燥箱中干燥 24 h,再将干燥后的产物用粉碎机进行粉碎,得到白色粉末状产物,即为抗温耐盐降滤失剂 (DY),合成产物过程见图 2。

图 2 合成 DY 的过程

1.3 钻井液的配置和性能评价

1.3.1 钻井液的配置

准确量取 1 000 mL 水,向其中加入 20 g 膨润土和 2 g 无水碳酸钠,使用高速搅拌设备对其进行 20 min 的搅拌。搅拌完成后,将容器在室温条件下进行密闭处理,使其养护 24 h,经过上述操作,即可成功制备出浓度为 2% 的淡水基浆。按照相应比例加入占基浆总量若干质量比的 NaCl ,接着使用搅拌装置持续搅拌 20 min,使 NaCl 充分溶解并均匀分散

于基浆中。随后,将基浆在室温环境下放置,并进行密闭处理并养护 24 h,最终获得含有若干质量比的 NaCl 的盐水基浆。

1.3.2 性能评价

将 ZNN-D6 六速旋转黏度计的转速分别调至 600、300 r/min,在刻度盘读值稳定后,读取并记录刻度盘读数。

实验结果按式(1)~式(4)计算。

$$AV = \phi_{600}/2 \quad (1)$$

$$PV = \phi_{600} - \phi_{300} \quad (2)$$

$$YP = 0.511 \times (\phi_{300} - PV) \quad (3)$$

向过滤杯中加入样品至液面距密封端约 1 cm 处,放置滤纸后压紧过滤盖。在排液管下方放置量筒以收集滤液。迅速加压至设定值,并于第一滴滤液出现时开始计时。记录 7.5 min 内的滤液体积。实验结束后卸压,小心开盖,取出滤纸并清除滤饼。

$$FL_{API} = 2 \times V(7.5 \text{ min}) \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 DY 的表征分析方法

2.1.1 傅里叶变换红外光谱表征(FT-IR)

首先将 DY 在 60℃ 下经鼓风干燥箱进行烘干预处理,然后用 KBr 压片法对其分子结构进行表征。

DY 的红外光谱图如图 3 所示。3 439 cm^{-1} 为 N—H 的伸缩振动峰;2 935 cm^{-1} 为酰胺基的伸缩振动峰;1 679 cm^{-1} 为酰胺键中的 C=O 振动吸收峰,1 189 cm^{-1} 和 1 041 cm^{-1} 为特有的 $-\text{SO}_3^-$ 特征吸收峰。由此可以推断得到的 DY 与目标产物一致。

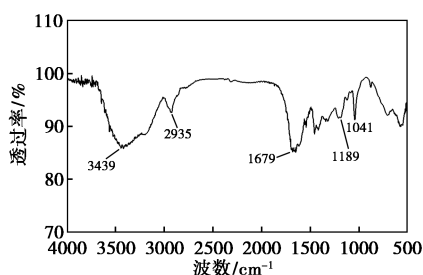


图 3 DY 的红外光谱图

2.1.2 热失重性能分析

采用热重测试仪对其热稳定性进行测试。实验在氮气氛围下进行,升温速率为 10℃/min,温度范围为 0~800℃。

由图 4 和表 1 可知,产品 DY 的失重分为 3 个阶段,第 1 阶段在 45.55~321.75℃ 质量损失为 32.48%,其中主要是由于产物中少量的自由水蒸发

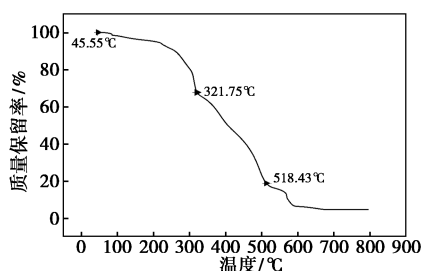


图 4 DY 的热失重分析

表 1 DY 的热重分析参数

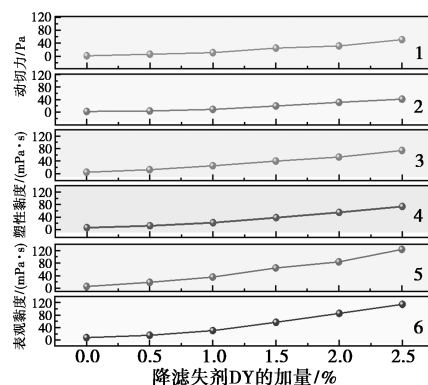
样品	$T_5\%$ /℃	$T_{20\%}$ /℃	$T_{\max\%}$ /℃	$T_{\text{over}\%}$ /℃	残炭率/%
DY	205.29	301.97	493.35	666.98	4.55

以及亲水基团造成的失重所致;第 2 阶段在 321.75~518.43℃ 质量损失为 49.13%,超过 321.75℃ 后产品快速分解,这部分的质量损失主要为分子中的主链受热分解;第 3 阶段为 518.43℃ 以上的分解,热失重曲线陡然下降,主要为剩余碳的热解所致。因此表明降滤失剂 DY 在高温下具有较好的热稳定性。

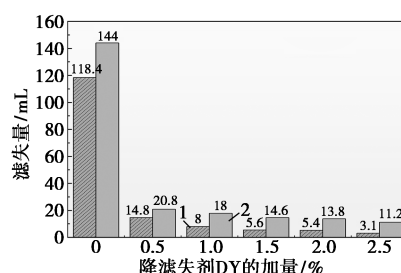
2.2 DY 的流变性及滤失性能测试

2.2.1 DY 的不同加量对流变性及滤失性能的影响

不同 DY 加量下,加入 15% NaCl,在 150℃/16 h 滚动老化前后钻井液流变和滤失性能评价结果如图 5 所示。



1—老化后 YP;2—老化前 YP;3—老化后 PV;
4—老化前 PV;5—老化后 AV;6—老化前 AV
(a) AV、PV、YP



1—老化前;2—老化后
(b) API 滤失量

图 5 加入不同含量的 DY 老化前后对性能的影响

由图 5 可知,随着 DY 含量的增加,钻井液的表观黏度(AV)、塑性黏度(PV)、动切力(YP)均逐步增加,表现出了良好的流变调节作用。常温常压(API)滤失量随着 DY 含量的增加而降低,当 DY 含量为 2.5% 时,老化后的 API 滤失量由 144.0 mL 降

低为 11.2 mL,表现出了优异的滤失性能,并且通过在井壁上形成低渗透性、致密坚韧的滤饼来封堵地层孔隙。

2.2.2 不同的老化温度对流变性及滤失性能的影响

加入 2.5% 的 DY、15% 的 NaCl,在 150~220℃/16 h 滚动老化前后钻井液流变和滤失性能评价结果如图 6 所示。

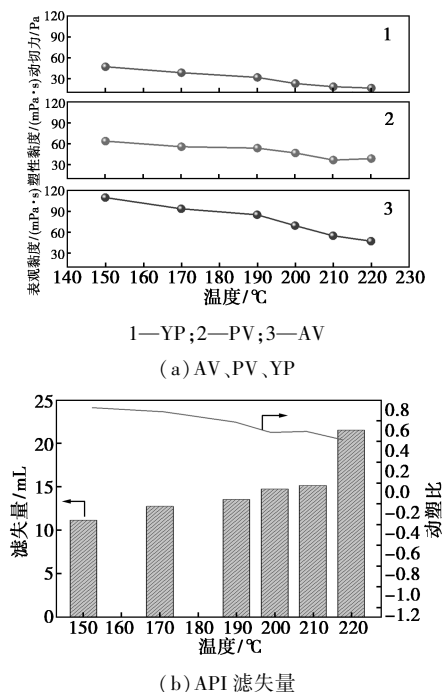


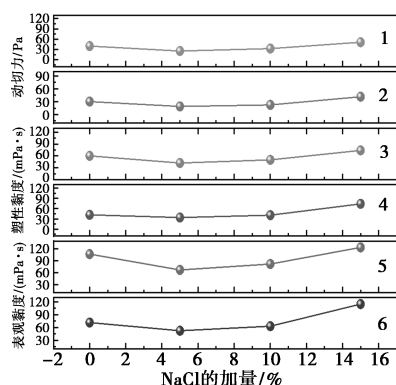
图 6 不同的老化温度对性能的影响

由图 6 可知,在 150~220℃ 的高温条件下,随着温度的升高,钻井液的表现黏度 (AV)、塑性黏度 (PV) 和动切力 (YP) 均呈现显著下降的趋势,AV、PV、YP 分别为 109.5~47.3、64.0~39.0 mPa·s、46.9~16.5 Pa,这表明钻井液的总体流动阻力、内部摩擦力和网架结构强度被高温严重削弱。钻井液的 API 滤失量呈现明显增大的趋势,从 11.2 mL 增加到 21.6 mL,这表明一旦分子链因高温断裂,其封堵能力就大大减弱,滤饼的孔隙变大、结构变得疏松,无法有效阻止滤液通过,导致滤失量急剧上升。

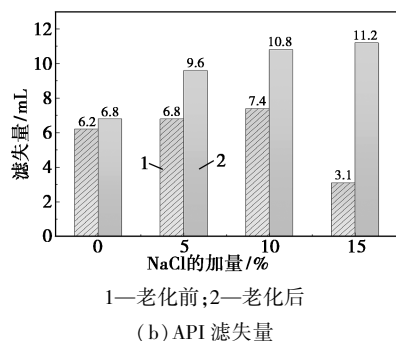
2.2.3 不同的盐浓度对流变性及滤失性能的影响

加入 2.5% 的 DY、0~15% 氯化钠,在 150℃/16 h 滚动老化前后钻井液流变和滤失性能评价结果如图 7 所示。

由图 7 可知,随着 NaCl 浓度的增加,各项参数均呈现非单调性变化,其根本原因在于:盐的“抑制-絮凝”双重作用机制随其浓度变化而发生主导地位的转换^[17]。在低浓度区:抑制效应主导,表现



1—老化后 YP;2—老化前 YP;3—老化后 PV;
4—老化前 PV;5—老化后 AV;6—老化前 AV
(a) AV、PV 和 YP



(b) API 滤失量

图 7 加入不同浓度的 NaCl 老化前后对性能的影响

为粘度、切力下降,滤失控制能力减弱。在高浓度区:强絮凝效应主导,表现为粘度、切力上升,滤失量先降(老化前)后升(老化后)。对于高温老化后,暴露了不同盐浓度下体系结构的稳定性,适量盐可能与处理剂、粘土形成了抗温复合结构,因此加入 DY 后,钻井液体系能保持优良的抗高温耐盐能力。

2.3 机理分析

2.3.1 扫描电子显微镜 (SEM) 分析

为探究 DY 在钻井液中的作用机制,将配制好的盐水基浆与含 2.5% DY 的盐水基浆在 150℃ 老化 16 h 后进行 API 测定,测定后取其滤饼并烘干。

由图 8 可知,未加入 DY 的滤饼厚且松散,而加入 DY 后滤饼变得薄而韧,通过分析图 9 可知,盐水

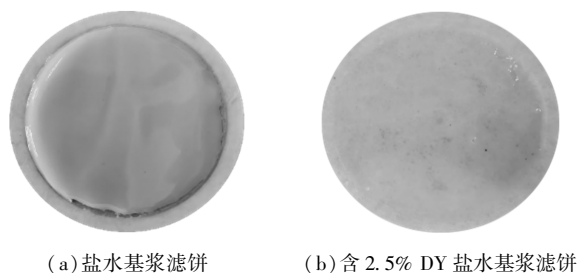


图 8 加 DY 前后的滤饼照片

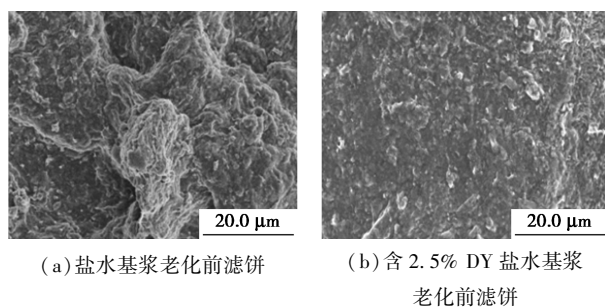


图 9 加 DY 前后的 SEM 图片

基浆的滤饼表面黏土颗粒互相堆叠聚结明显,存在团聚和分散不良现象。为水分子提供了渗透通道而造成滤失效果极差,而加入 DY 的滤饼表面光滑没有明显的大颗粒堆积,孔隙更小且分布均匀,显示出更高的致密性。这表明降滤失剂通过有效桥接和填充作用改善了滤饼质量,从而降低了滤失量,增强了井壁稳定性,提升了钻井液的整体性能。

2.3.2 EDS 分析

能量色散 X 射线能谱仪(EDS)通过不同元素发出的特征 X 射线具有不同波长和强度的特点,可以对物质中的元素种类和含量进行分析^[18]。因此可以通过 EDS 对比盐水基浆滤饼和加入降滤失剂后的盐水基浆滤饼的元素变化,来判断聚合物是否与土浆发生作用吸附在一起,盐水基浆和含 2.5% DY 盐水基浆滤饼的元素含量见图 10。

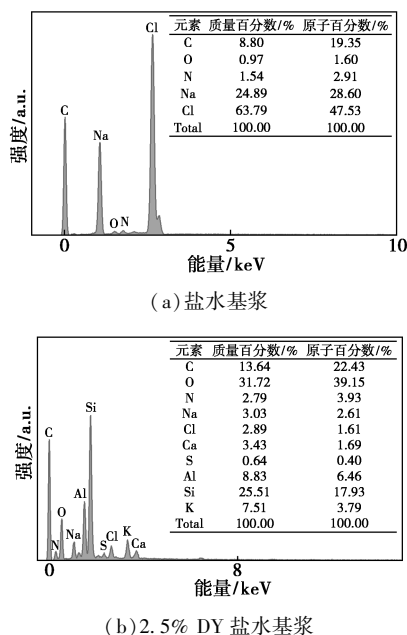


图 10 盐水基浆和含 2.5% DY 盐水基浆滤饼的元素含量

由图 10 可知,盐水基浆中 Na 和 Cl 两种元素的质量比约为 89%,另外还有 8.80%的 C 及少量 O、N

元素,所以盐水基浆的主要成分为氯化钠溶液,同时含有大约 9%的有机质成分(以碳计)及微量氧氮化合物。将 DY 加入盐水基浆,会导致盐水基浆的元素种类和含量发生改变,可以发现加入 2.5% DY 后,盐水基浆滤饼上的元素含量发生显著变化,C 元素的质量百分比增加了 4.84%;另外分别新增了来自于 AM 和 AMPS 中 1.25%的 N 元素、AMPS 中 0.64%的 S 元素和 CaCO_3 中 3.43%的 Ca 元素。加入 DY 前后滤饼中元素含量的变化,证实了降滤失剂有效的附着在黏土颗粒中。

2.3.3 BET 分析

由表 2 可知,基浆老化后滤饼比表面积为 $11.7415 \text{ m}^2/\text{g}$ 、孔容积为 0.0654 mL/g ,而加入 DY 的滤饼比表面积为 $4.0891 \text{ m}^2/\text{g}$ 、孔容积为 0.0200 mL/g ,说明未加入 DY 滤饼的结构疏松多孔,且孔体积较大,水分子极易通过,滤失效果差,加入 DY 后比表面积及孔容积显著降低,说明形成的滤饼结构致密,孔隙较小,对应着较好的降滤失效果。

表 2 DY 对滤饼结构的影响

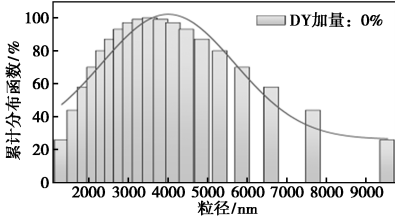
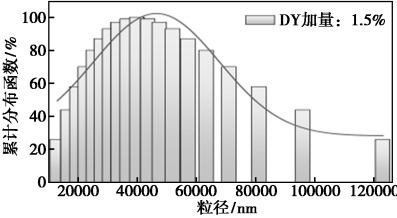
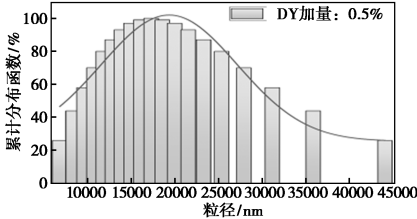
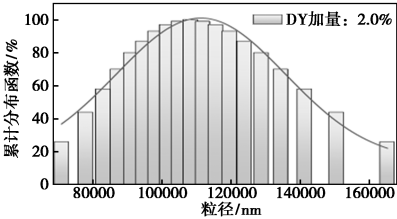
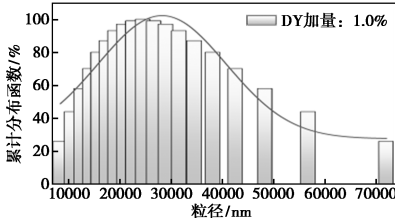
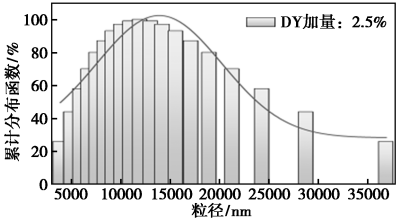
	基浆 老化前 滤饼	基浆 老化后 滤饼	含 DY 基浆 老化前 滤饼	含 DY 基浆 老化后 滤饼
比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	11.7415	83.4242	4.0891	3.3612
孔容积/ $(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1})$	0.0654	0.6718	0.0200	0.0231

2.3.4 粒度分布分析

降滤失剂加量会影响其钻井液颗粒大小及分布。按照上述方法配置好基浆,分别在基浆中加入 0%~2.5% DY,充分搅拌后,将不同降滤失剂加量下的土浆加入到激光粒度仪,待样品溶解均匀达到仪器检测信号范围后进行测定,实验结果见表 3。

由图 11 可知,空白滤纸的 SEM 显示孔径范围约为 $18 \mu\text{m}$ 至 $23 \mu\text{m}$ (根据比例尺)。根据“最佳颗粒尺寸理论”,当密封材料的平均粒径满足 $D_{\text{mean}} \approx (0.33 \sim 0.67) \times \text{孔径}$ 时,即可同时实现桥接稳定性和孔隙填充效率。这意味着对于盐水基浆液中的流体损失抑制剂(DY),当粒径处于 5940 nm 至 15410 nm 范围内时,其性能将达到最佳状态。在此条件下,颗粒尺寸分布被认为最符合地层孔隙尺寸的理想 $1/3 \sim 2/3$ 黄金比例。因此由表 3 可知,在 DY 含量为 2.5%时, D_{mean} 为 14189.2 nm ,此时符合 $1/3$ 至 $2/3$ 原则,既保证了初始桥接稳定性,又为小颗粒填充预留了充足空间,从而实现最佳过滤效果^[19]。

表 3 不同 DY 加量的盐水基浆的粒度

DY 加量/%	粒度/nm	粒径分布图	DY 加量/%	粒度/nm	粒径分布图
0.0	$D_{50} = 3544.2$ $D_{平均} = 4049.4$ $D_{10} = 1637.0$ $D_{90} = 7673.3$		1.5	$D_{50} = 40007.2$ $D_{平均} = 47444.7$ $D_{10} = 16666.5$ $D_{90} = 96035.8$	
0.5	$D_{50} = 17323.9$ $D_{平均} = 19518.45$ $D_{10} = 8347.5$ $D_{90} = 35953.0$		2.0	$D_{50} = 108168.4$ $D_{平均} = 110868.1$ $D_{10} = 77761.9$ $D_{90} = 150464.4$	
1.0	$D_{50} = 24504.3$ $D_{平均} = 28679.3$ $D_{10} = 10573.7$ $D_{90} = 56788.0$		2.5	$D_{50} = 11949.5$ $D_{平均} = 14189.2$ $D_{10} = 4961.3$ $D_{90} = 28781.0$	

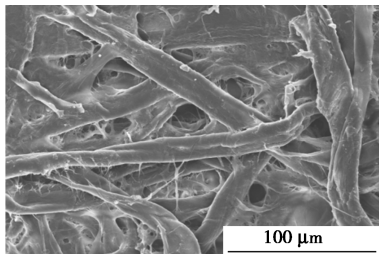


图 11 空白滤纸的 SEM 图像

2.3.5 Zeta 电位分析

Zeta 电位数值的低高间接反应体系配方中微粒的稳定性,主要因为该值表征微粒表面所带电荷数量的多少,当微粒表面带电量越多后,微粒之间的静电斥力越大,微粒的分散性越好,在宏观上反映钻井液体系的物理稳定性越好^[20]。

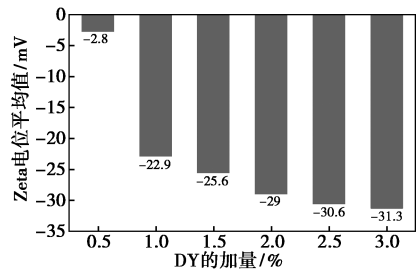


图 12 盐水基浆的 Zeta 电位

由图 12 可知,降滤失剂(DY)的加量和微粒表面 Zeta 电位的绝对值呈正相关,这是由于降滤失剂的吸附基团增加了黏土表面的负电荷,使双电层的 Zeta 电位提高,从而使得范德华力远小于静电斥力,阻止颗粒的继续沉降,使基浆中的黏土颗粒分布均匀,增加了其稳定性。

3 结论

(1)本研究以丙烯酰胺(AM)和 2-丙烯酰胺基-2-甲基丙烷磺酸(AMPS)为单体,通过包覆纳米碳酸钙(CaCO_3)并引发聚合,成功制备出了一种新型抗温耐盐降滤失剂 DY。FT-IR 光谱分析证实了其分子结构与设计目标一致。TG 分析证明了 DY 具有良好的热稳定性($T_{5\%} = 205.29^\circ\text{C}$),这是其抗温性能的结构基础。

(2)性能评价表明,所合成的降滤失剂 DY 具有卓越的抗高温(210°C)和抗盐(15% NaCl)能力。在最优加量(2.5%)下,能将盐水基浆经 150°C 老化后的 API 滤失量从 144.0 mL 大幅降低至 11.2 mL,同时能有效调节钻井液的流变性(AV 为 $124.0\text{ mPa}\cdot\text{s}$, PV 为 $74.0\text{ mPa}\cdot\text{s}$),表现出优异的综合性能。

(3)通过多维度表征揭示了 DY 的作用机理:

SEM 与 BET 分析表明, DY 的加入能形成更薄、更致密、孔隙更细的滤饼, 有效封堵渗流通道。EDS 分析证实了 DY 分子成功吸附在黏土颗粒上。粒度分析表明, 在 2.5% 加量下, 颗粒平均粒径 ($D_{\text{mean}} = 14\ 189.2\ \text{nm}$) 符合“1/3~2/3”理想封堵理论, 实现了桥接与填充的最佳平衡。Zeta 电位分析表明, DY 能提高黏土颗粒表面的负电荷, 增强静电斥力, 从而改善颗粒分散稳定性, 利于形成致密滤饼。

参考文献

- [1] Guo X S, Hu D F, Li Y P, *et al.* Theoretical progress and key technologies of onshore ultra-deep oil/gas exploration[J]. *Engineering*, 2019, 5(3): 458–470.
- [2] Wang B, Gong S L, Shi C L, *et al.* Study on preparation and mechanism of high temperature and high salt resistance fluid loss reducer[J]. *ACS Omega*, 2025, 10(7): 7172–7180.
- [3] Li X R, Bai Y, Gu D, *et al.* Application of graphene oxide/polymer composites as filter loss reduction agents with water-based drilling fluids[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2025, 142(17): 56791–56804.
- [4] Tian M, Yang C, Huang Q, *et al.* Synthesis and evaluation of high-temperature-resistant and environmentally friendly polymer filter loss additives[J]. *Polymers*, 2025, 17(6): 792–813.
- [5] 王中义, 孙金声, 黄贤斌, 等. LCST 型温度敏感聚合物的研究及其在钻井液领域的应用进展[J]. *精细化工*, 2024, 41(10): 2103–2119.
- [6] Oladipo I O, Faraji F, Habibi H, *et al.* Feasibility study of biodegradable vegetable peels as sustainable fluid loss additives in water-based drilling fluids[J]. *J-Multidisciplinary Scientific Journal*, 2025, 8(1): 10–37.
- [7] Nwiyoronu J K, Onojake M C, Oriji G O, *et al.* Evaluation of shell powders of bush mango and hamburger bean as eco-friendly fluid loss control additives in water-based drilling mud[J]. *Discover Applied Sciences*, 2024, 6(10): 544–552.
- [8] Xiong D M, Han X. Particular pollutants, human health risk and ecological risk of oil-based drilling fluid: A case study of Fuling shale gas field[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, 45(3): 981–995.
- [9] Ogeleka D F, Tudararo-aherobo L E. Short-term toxicity of oil-based drilling fluid to the brackish-water shrimp *Palaemonetes africanus* [J]. *African Journal of Aquatic Science*, 2011, 36(1): 109–112.
- [10] Li Q, Luo X, Liu F B, *et al.* Revitalizing biopolymers to prepare temperature-resistant and salt-tolerant filtrate reducer by combining light-driven lignin depolymerization and subsequent photopolymerization on MIL-100(Fe)-NH₂(20) photocatalyst[J]. *Macromolecules*, 2024, 279(4): 135492–135504.
- [11] Khan A M, Lalji M S, Ali I S, *et al.* Application of hydrothermal synthesized titanium dioxide-doped multiwalled carbon nanotubes on filtration properties-response surface methodology study[J]. *ACS Omega*, 2024, 9(32): 34765–34776.
- [12] Liu Y L, Djouonkep W D L, Yu B, *et al.* Preparation of ultra-high temperature resistant cyclodextrin-based filtration loss reducer for water-based drilling fluids[J]. *Molecules*, 2024, 29(12): 2933–2949.
- [13] Li J, Ji X Y, Ni X X, *et al.* A micro-crosslinked amphoteric hydrophobic association copolymer as high temperature- and salt-resistance fluid loss reducer for water-based drilling fluids[J]. *Petroleum Science*, 2024, 21(3): 1980–1991.
- [14] Li X J, Yin H, Zhou S M, *et al.* The development of anti-salt fluid loss additive for cement-metakaolin slurry with semi-saturated/saturated saline water: The application of maleic anhydride[J]. *Processes*, 2024, 12(2): 1–17.
- [15] 崔彦琦, 于洪江, 雷亮, 等. 水基钻井液复合纳米成膜封堵剂的制备及性能[J]. *精细化工*, 2024, 41(9): 2031–2037.
- [16] Balaga K D, Mondal J, Kulkarni D S. Performance analysis and degradation mechanism of acrylamide co-polymer as rheology and filtrate reducers in different salt aqueous-based drilling mud systems at high-temperature conditions[J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2024, 14(8/9): 2555–2568.
- [17] Yan Y, Hou Q, Zhang Y, *et al.* A molecular dynamics simulation study on the inhibition performance controlled by salt concentration[J]. *Chemical Physics Letters*, 2019, 715: 335–340.
- [18] Yao M, Wang D Y, Zhao M. Element analysis based on energy-dispersive x-ray fluorescence[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 2015: 1–7.
- [19] Delavari A, Baltus R. The effect of the pore entrance on particle motion in slit pores: Implications for ultrathin membranes[J]. *Membranes*, 2017, 7(3): 42–56.
- [20] Olivaria F D, Escalante M J, Robinson M G K, *et al.* Physicochemical and microstructural characteristics of sulfated polysaccharide from marine microalga[J]. *Analytica*, 2023, 4(4): 527–537. ■
- [21] 程晓猛. 杂多酸(盐)与负载型杂多酸催化 4,4'-二氨基二苯甲烷合成反应研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2016.
- [22] Yandratı L P, Kaladi S S, Gundebayina R, *et al.* Tailoring Cu immobilized MCM-41-based mesostructured catalysts for selective hydrogenolysis of biomass-derived Furfural[J]. *Catalysis Communications*, 2024, 187: 106898.
- [23] 魏远航. 硅钨酸改性 CeO₂ 催化剂催化氧化氯苯研究[D]. 沈阳: 沈阳化工大学, 2021.
- [24] Toprakçı İ, Özdemir H, Öksüzömer M A F, *et al.* H-MCM-22 synthesis, characterization, and application: Performance for the removal of diclofenac from aqueous solution[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2023, 14(24): 31643–31652.
- [25] 高玉芳, 侯楠, 梁亚凝, 等. 纳米薄层 MCM-22 分子筛合成及其三甲苯异构化催化性能[J]. *无机化学学报*, 2024, 40(6): 1079–1087.
- [26] 韩文雯. MCM-22 分子筛的合成、改性及烷基化反应性能[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
- [27] Tran A V, Lee H J, Baik J H, *et al.* Montmorillonite K30 supported tungstophosphoric acid as an efficient catalyst for condensation reaction of methyl N-phenylcarbamate for generating diurethane[J]. *Catalysis Letters*, 2021, 152(7): 2206–2214. ■

(上接第 191 页)